

Fachbereich Medien

Ullrich Schirm

Anatomiekonformes Rigging des menschlichen Skeletts

- Diplomarbeit -

Hochschule Mittweida - University of Applied Sciences (FH)

Mittweida - 2009

Fachbereich Medien

Ullrich Schirm

Anatomiekonformes Rigging des menschlichen Skeletts

- eingereicht als Diplomarbeit -

Hochschule Mittweida - University of Applied Sciences (FH)

vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am 29.09.2009

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Müller

Zweitprüfer:

Dipl. Inf. Thomas Frei

Mittweida - 2009

Schirm, Ullrich:

Anatomiekonformes Rigging des menschlichen Skeletts. - 2009 - 118 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), Fachbereich Medien, Diplomarbeit

Referat:

Die Diplomarbeit beschäftigt sich mit Charakter Rigging unter Benutzung der 3D- Software Autodesk® 3ds Max 9®. Ziel ist es, die funktionelle Anatomie des menschlichen Skeletts möglichst exakt und detailliert auf ein virtuelles, dreidimensionales Skelettmodell zu übertragen. Dazu erfolgt neben einer Erläuterung der Grundlagen der Computeranimation auch eine detaillierte Analyse der menschlichen Gelenkanatomie. Es wird hier besonders auf die Bewegungsmöglichkeiten und Freiheitsgrade des Skeletts eingegangen. Außerdem werden die wichtigsten Rigging- Werkzeuge der Software Autodesk® 3ds Max® erläutert, um sie in einem praktischen Versuch sinnvoll anzuwenden. Dieser praktische Versuch die menschliche Anatomie auf das Skelettmodell zu übertragen wird in der Arbeit ausführlich beschrieben.

Inhalt

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VII
TABELLENVERZEICHNIS	IX
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	X
EINLEITUNG	11
1 RAHMENBEDINGUNGEN	13
1.1 Zielsetzung der Arbeit	13
1.2 Autodesk® 3ds Max 9®	14
1.3 Das Skelettmodell von Zygote	16
2 GRUNDLAGEN DER COMPUTERANIMATION	18
2.1 Ansätze der Robotik als Grundlage der Computeranimation	18
2.2 Koordinatensysteme und Koordinatentransformationen	20
2.2.1 Koordinatensysteme	20
2.2.2 Koordinatentransformation	22
2.3 Hierarchien	25
2.3.1 Allgemeine Definition	25
2.3.2 Hierarchien in der 3D- Computeranimation	25
2.4 Kinematik in 3D- Animationen	27
2.4.1 Kinematische Ketten	27
2.4.2 Direkte Kinematik (Vorwärtskinematik)	28
2.4.3 Inverse Kinematik	31
2.5 Rigging (Animationsvorbereitung)	33
2.6 Definition von Untersuchungsparametern	36
2.6.1 Pivotpunkte	36
2.6.2 Freiheitsgrade der Translation und Rotation	36
2.6.3 Kinematische Ketten	38

2.6.4	Tabellarische Zusammenfassung der Untersuchungsparameter.....	38
3	ANATOMIE DES MENSCHLICHEN SKELETTS	39
3.1	Allgemeine Anatomie des menschlichen Skeletts	39
3.2	Funktionelle Anatomie der Gelenke.....	42
3.2.1	Allgemeine Bewegungsabläufe.....	42
3.2.2	Kriterien zur Klassifizierung der Gelenke.....	43
3.2.3	Gelenktypen nach Gelenkflächenformen	44
3.2.4	Beweglichkeit des menschlichen Skeletts	47
4	RIGGING-WERKZEUGE IN 3DS MAX9® UND DEREN EIGNUNG ..	64
4.1	Vordefinierte Steuerstruktur (Biped)	64
4.1.1	Grundaufbau.....	64
4.1.2	Arbeitsschritte der Implementierung des Biped	67
4.1.3	Methoden der Biped-Animation.....	68
4.2	Manuell definierte Steuerstrukturen.....	70
4.2.1	Das Bones-System	70
4.2.2	Helferobjekte.....	72
4.2.3	Inverse Kinematische Ketten	75
4.2.4	Verknüpfung von Parametern	77
4.2.5	Beschränkungen von Bewegungen	80
5	RIGGING DES ZYGOTE SKELETTMODELLS	85
5.1	Grundlegender Bauplan.....	85
5.2	Direkte Modifikation des Skelettmodells	85
5.3	Indirekte Modifikation des Skelettmodells	87
5.3.1	Festlegung der Drehpunkte der einzelnen Modellknochen	88
5.3.2	Zusammenfassung von Modellknochen (Gruppierung)	93
5.4	Entwicklung der Steuerstruktur.....	96
5.4.1	Die Wirbelsäule.....	96
5.4.2	Der Brustkorb.....	100
5.4.3	Die Schulter.....	101
5.4.4	Der Arm	103
5.4.5	Das Kniegelenk	105

5.4.6	Das Fußgelenk.....	106
5.4.7	Verlinkung der Steuerhelfer.....	107
6	ZUSAMMENFASSUNG	110
6.1	Gegenüberstellung von Zielsetzung und Ergebnis.....	110
6.2	Zusammenfassung und Bewertung	110
6.2.1	Durchführung des Riggings	110
6.2.2	Bewertung der Anatomiekonformität.....	111
6.2.3	Praktische Bewertung des Riggings	112
6.2.4	Allgemeine Bewertung dieses Versuchs	112
7	AUSBLICK ZUR WEITERENTWICKLUNG.....	113
	LITERATURVERZEICHNIS.....	115
	SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG	118

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Screenshot Autodesk 3ds Max 9	15
Abbildung 2: Männliches Skelettmodell der Zygote Media Group	16
Abbildung 3: Direkte Kinematik	29
Abbildung 4: „Basic Hierarchy of Human Body”	34
Abbildung 5: Translationen innerhalb einer kinematischen Kette	37
Abbildung 6: Gelenkformen	44
Abbildung 7: Diagramm Bewegungsgrade der HWS-Segmente	48
Abbildung 8: Diagramm Bewegungsgrade der BWS-Segmente	49
Abbildung 9: Diagramm Bewegungsgrade der LWS-Segmente	50
Abbildung 10: Gelenke der Schulter	51
Abbildung 11: Bewegungen des Schulterblattes	52
Abbildung 12: Bewegungen im Handgelenk	55
Abbildung 13: Bewegungsachsen im Hüftgelenk	58
Abbildung 14: Rotationsachse und Achsenverschiebung im Kniegelenk	59
Abbildung 15: Bewegungsachsen der Kniescheibe	60
Abbildung 16: Bewegungsachsen des Fußes	62

Abbildung 17: Objekthierarchie eines Bipeds.....	65
Abbildung 18: Punkthelfersymbol und Parameterpalette	73
Abbildung 19: möglicher Drehpunkt eines Wirbels (links: von links, rechts: von vorn).....	89
Abbildung 20: Bones-Kette der Wirbelsäule	97
Abbildung 21: Ausrichtungsproblem der Bones	98

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Untersuchungsparameter.....	38
Tabelle 2: Fingergelenke und ihre Freiheitsgrade	57
Tabelle 3: Freiheitsgrade der Zehngelenke	63
Tabelle 4: Steuerhelfer und ihre Eigenschaften Teil 1.....	108
Tabelle 5: Steuerhelfer und ihre Eigenschaften Teil 2.....	109

Abkürzungsverzeichnis

Bew.	Bewegung
BWS	Brustwirbelsäule
CA	Computeranimation
CG	Computergrafik
HW	Halswirbel
HWS	Halswirbelsäule
IK	Inverse Kinematik
LKS	Lokales- Koordinaten- System
LWS	Lendenwirbelsäule
OSG	oberes Sprunggelenk
Rot.	Rotation
TSG	Tarsalgelenke
USG	unteres Sprunggelenk
VK	Vorwärtskinematik
WKS	Welt- Koordinaten- System

Einleitung

Computeranimationen stellen heutzutage ein fast unverzichtbares Gestaltungsmittel im Entertainment-Bereich dar. Jedes Jahr laufen neue Filme in den Kinos an, die komplett im Computer entstanden sind. Fast jeder hat so einen Animationsfilm von Firmen wie z.B. Pixar¹ schon einmal gesehen, oder zumindest davon gehört. Aber auch bei der Produktion von konventionellen Spielfilmen mit realen Schauspielern und Requisiten ist die 3D- Animation fester Bestandteil geworden. So ist es zum Beispiel möglich, dass die Gefährten aus dem Kinofilm „Herr der Ringe“² in monumentalen Schlachten gegen allerlei Fantasiewesen aus Tolkiens Welt kämpfen. Die unzähligen Möglichkeiten der Computergrafik (CG) sind heute in Film und Fernsehen ein unverzichtbarer Bestandteil.

3D- Animationen kommen jedoch auch über den Entertainment-Bereich hinaus zum Einsatz. Zum Beispiel zur Visualisierung von komplexen, medizinischen oder biochemischen Vorgängen und Sachverhalten ist die 3D- Computergrafik sehr gut geeignet. Hier liegt der Schwerpunkt der Firma CAST GmbH & Co. KG³ in Dresden. Aufgrund der hohen Nachfrage der Pharma-Industrie spezialisierte sich das Unternehmen auf den Bereich der „Medical 3D- Animation“. Neben Informationsfilmen für Patienten werden größtenteils Filme für medizinisch geschultes Fachpersonal produziert. Durch grafisch ansprechende Animationen entstehen leicht verständliche Filme mit wissenschaftlichem Inhalt. Die dafür verwendeten Modelle sind überwiegend Eigenentwicklungen der Firma CAST. Ergänzt werden diese durch lizenzierte Modelle der Firma Zygote⁴. Die wichtigsten dieser käuflich erworbenen Modelle sind die kompletten Baukästen- Modelle von Mann und Frau. Sie enthalten alle Elemente vom Skelett über die Organe bis hin zur Hautoberfläche. Ziel ist es, diese anatomisch korrekten Modelle so zu verändern, dass sie mit wenigen Parametern projekt- und kundenspezifisch angepasst werden können. An diesem Punkt setzt die vorliegende Diplomarbeit an, welche als Thema den ersten Schritt dieses Weiterentwicklungsprozesses un-

¹ www.pixar.com Pixar Animation Studios, California ,US

² Filmtrilogie 2001-2003 basierend auf den Romanen von J. R. R. Tolkien

³ www.cast-pharma.com

⁴ www.zygote.com

tersucht und beschreibt. Dieser Schritt ist das anatomiekonforme Rigging des männlichen Skelettmodells.

Rigging⁵ bedeutet, dass für dieses Modell eine Steuerstruktur entwickelt werden muss, um es in Animationen bewegen zu können. Dabei ist eine besondere Anforderung dieser Arbeit, die funktionelle Anatomie der natürlichen Gelenke des menschlichen Körpers möglichst exakt auf das Computer- 3D- Modell zu übertragen. Kapitel 1 dieser Arbeit beschreibt zunächst die allgemeinen Rahmenbedingungen für diesen Weiterentwicklungsprozess. In Kapitel 2 werden allgemeingültige Grundlagen der Computeranimation erörtert, die für diese Arbeit von Bedeutung sind. Um den besonderen Anforderungen im Rahmen dieser Arbeit gerecht zu werden, wird in Kapitel 3 die menschliche Anatomie in Bezug auf die funktionalen Besonderheiten des Bewegungsapparates untersucht. Kapitel 4 handelt von den Implementierungsmöglichkeiten einer Steuerstruktur mit der 3D- Software Autodesk 3ds Max 9^{®6}. Im 5. Kapitel wird die Vorgehensweise zur Entwicklung der Steuerung am Praxisbeispiel detailliert erläutert. Die gewonnenen Erfahrungen und Vorgehensweisen werden in Kapitel 6 noch einmal zusammengefasst und zur Diskussion gestellt. In Kapitel 7 gibt der Autor einen Ausblick auf die mögliche Weiterentwicklung der Thematik des anatomiekonformen Riggings.

⁵ siehe Kapitel 2.5 Rigging (Animationsvorbereitung)

⁶ siehe Kapitel 1.2 Autodesk[®] 3ds Max 9[®]

1 Rahmenbedingungen

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, eine Steuerstruktur zu entwickeln, mit der ein menschliches Skelettmodell in Animationen bewegt werden kann. Es besteht der Anspruch, die Funktionalität der menschlichen Gelenke so exakt wie möglich auf das 3D-Modell zu übertragen.

Um die Zielsetzung zu erfüllen muss die Steuerstruktur folgende Eigenschaften haben:

- möglichst exakte Nachahmung anatomischer Vorgaben
- möglichst geringe Komplexität
- Nachvollziehbarkeit für weitere Modelle
- gute Handhabbarkeit

Im Einzelnen bedeutet das:

Der menschliche Bewegungsapparat ist eine komplexe Konstruktion, die aus Gelenken, Sehnen und Muskeln besteht. Zweck der vorliegenden Arbeit ist es, dieses System mit Hilfe einer 3D-Software nachzubauen und dabei die Bewegungsfunktionen möglichst detailliert zu erhalten. Die dadurch entstehende Konstruktion, in dieser Arbeit als Steuerstruktur bezeichnet, sollte so einfach wie möglich aufgebaut sein. Je einfacher die Steuerstruktur, desto besser ist sie auch auf weitere Modelle anwendbar. Die Handhabbarkeit bezieht sich auf die Animierbarkeit. So muss durch Vereinfachung gewährleistet werden, dass der Benutzer die Steuerstruktur problemlos und effizient für Animationen verwenden kann. Vereinfachung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass über die Steuerstruktur ein Benutzerinterface gebaut wird, mit dem Bewegungen schnell und effizient animiert werden können.

1.2 Autodesk® 3ds Max 9®

Die aktuellste Version der 3D- Software 3ds Max® ist das im April 2009 erschienene 3ds Max® 2010. Diese Arbeit entstand unter der Benutzung der deutschen Version von 3ds Max® 9.

„Autodesk® 3ds Max® ist eine umfassende Lösung für 3D- Modelling, -Animation, -Rendering und visuelle Effekte, die bei der Produktion kommerziell erfolgreicher Spiele und vielfach ausgezeichneten Filme und Videos eingesetzt wird. Leistungsstarke Tools ermöglichen die rasche und effiziente Entwicklung realistischer Charaktere, beeindruckender CG-Effekte und spektakulärer Umgebungen.“⁷

Autodesk® 3ds Max 9® ist eine Windows-basierende Software zur Erstellung von virtuellen, dreidimensionalen Objekten und deren Animation. Die Software besitzt eine hohe Bandbreite an Werkzeugen für die verschiedensten Bereiche wie zum Beispiel: Modellierung, Animation, Texturierung etc. Die einfache Erweiterbarkeit durch Plug-Ins und durch die interne Scriptsprache „Maxscript“ macht Autodesk® 3ds Max 9® sehr flexible und vielseitig einsetzbar.

3D Studio Max 1.0 wurde erstmals 1995 auf der SIGGRAPH⁸ vorgestellt und war der Nachfolger der Software Autodesk 3D Studio R4 für MS-DOS-basierte Computer. 3D Studio Max 1.0 enthielt die Funktionalität des Vorgängers. Wichtigste Neuerungen waren neben einer Windows-basierten Benutzeroberfläche ein objektorientierter Ansatz im Modellierungsprozess mittels des Modifikatorstapels, das Benutzen von externen Renderern und der Materialeditor. Dieser Version folgten 1997-1999 3D Studio Max R2 – R3 unter dem Markennamen „Kinetix, a division of Autodesk“⁹. Autodesk kaufte die kanadische Software-schmiede für „Highend-Special-FX“ Discreet und ordnete 3dsmax aus Marketinggründen in deren Produktspektrum ein. Deshalb erschien die Software im Juli 2000 in neuer Schreibweise und unter neuem Markennamen als Discreet® 3dsmax 4®. Unter anderem wurde hier

⁷ (Autodesk, 2009)

⁸ *Special Interest Group on Graphics and Interactive Techniques* (www.siggraph.org)

⁹ www.kinetix.com

ein neues IK-System eingebaut. Als die Marke Discreet an Bedeutung verlor erschien Version 8 2005 wieder unter dem Namen Autodesk® 3ds Max®. Mit 3ds Max 9® gab es ab 2006 zum ersten Mal auch eine Version für 64bit Systeme. Autodesk 3ds Max 2008® war im Oktober 2007 der erste Release, welcher Windows Vista unterstützte. Nur 8 Monate später erschien Autodesk® 3ds Max 2009® in 2 Versionen als 3ds Max 2009® und 3ds Max 2009 Design®. Seit April 2009 ist das aktuellste 3ds Max 2010® ebenfalls in 2 Versionen auf dem Markt.

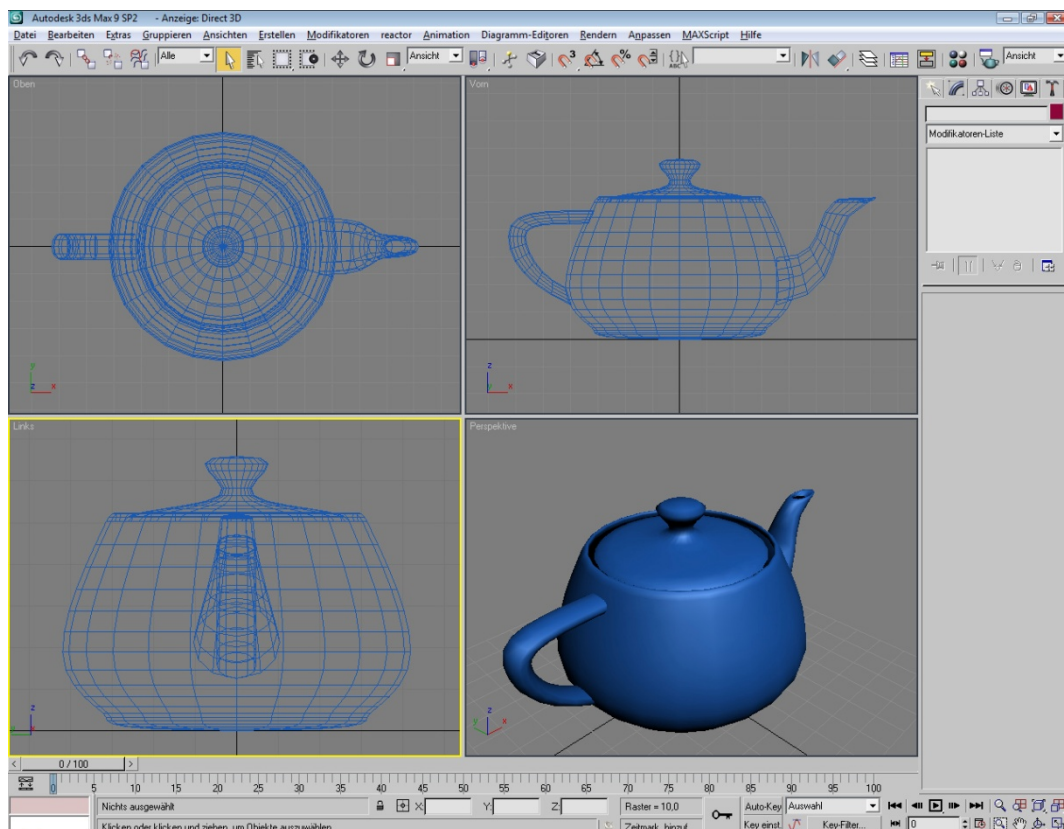


Abbildung 1: Screenshot Autodesk 3ds Max 9

1.3 Das Skelettmodell von Zygote

Für diese Diplomarbeit stand ein lizenziertes 3D- Modell der Firma Zygote zur Verfügung.

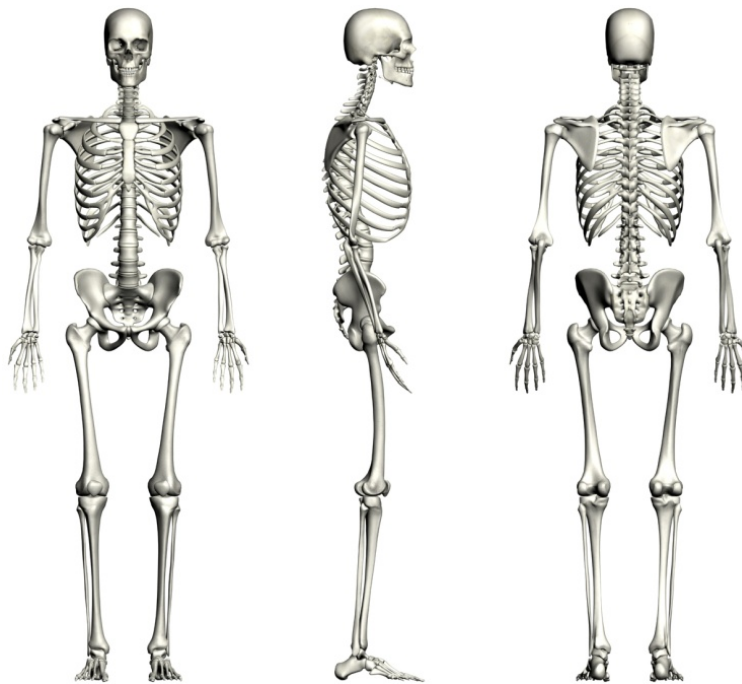


Abbildung 2: Männliches Skelettmodell der Zygote Media Group

Die Zygote Media Group¹⁰ ist ein 1994 gegründetes Unternehmen im Bundesstaat Utah USA. Als Dienstleister bietet die Firma 3D- Inhalte im Bereich Biomechanik, Unterhaltung und Produktwerbung an. Die Kompetenzen der Firma liegen im Modelling, Texturing, Rendering und Compositing. Laut ihrer Internetseite besitzt Zygote die größte kommerziell lizenzierbare Sammlung an anatomischen Modellen und Texturen.

Das dieser Arbeit als praktische Grundlage dienende Modell ist Teil dieser Sammlung. Die digitale Nachbildung eines realen männlichen Skeletts basiert (laut Zygote) auf Daten einer Computertomografie. Durch Nachmodellierung und Verfeinerung der Geometrie je-

¹⁰ www.zygote.com

des einzelnen Knochenobjekts konnte eine höchstmögliche Detailtreue in Bezug auf den Realitätsgrad erzielt werden. Insgesamt besteht das Skelett aus 184 Einzelobjekten. Alle sind mit einer farbigen Knochentextur und einer Relieftextur versehen. Die Relieftextur simuliert die oberflächlichen Unebenheiten und die Porigkeit der menschlichen Knochen. Jeder Knochen am realen Skelett entspricht genau einem Objekt im 3D- Modell. Davon ausgenommen sind die drei Sonderfälle:

- Oberschenkel mit Kniescheibe
- Rechte und linke Rippenhälfte
- Obere und untere Zahnreihe

Diese Knochengruppen sind im 3D- Modell zu jeweils einem Objekt zusammengefasst. Alle knorpeligen Zwischenscheiben der Wirbel (Bandscheiben) und die Knorpelverbindungen zwischen Rippen und Brustbein sind ebenfalls als einzelne Objekte vorhanden. Der Pivotpunkt (siehe. Kapitel 2.2) jedes Objektes liegt im globalen Koordinatenursprung. Im Praktischen Teil der Arbeit ist diese Pivotpunktlage von Bedeutung und wird näher erläutert. Außerdem ist das gesamte Modell symmetrisch zur x- Achse des Weltkoordinatensystems (WKS).

2 Grundlagen der Computeranimation

Definition Computeranimation: „Animation ist eine Technik, bei der die Illusion von Bewegung hervorgerufen wird, indem man dem Betrachter in schneller Folge Einzelbilder einer kontinuierlichen Bewegung präsentiert. Werden die einzelnen Bilder mit Hilfe eines entsprechenden Computerprogramms erzeugt, so spricht man von Computeranimation.“¹¹

2.1 Ansätze der Robotik als Grundlage der Computeranimation

„Die Grundaufgabe der Robotik ist die Frage der Beschreibung der Raumlage gewisser Körper, die mit dem Roboter zum Zweck der Bewegung starr verbunden sind (z.B. die Gelenke, der Endeffektor, das Werkzeug...).“¹²

Die Robotik ist ein Teilgebiet der Naturwissenschaften zusammengesetzt aus verschiedenen Gebieten von Wissenschaft und Technik¹³:

- Mathematik und besonders Geometrie-Beschreibung der Roboterbewegung
- Mechanik-Lösung der statischen und dynamischen Aufgaben
- Steuerungstheorie-Methoden der Realisierung und Auswertung der Roboterbewegung und die Anwendung der Kräfte
- Elektrotechnik-Instrumente für Messungen der Interaktion mit der Umgebung
- Programmierung und Computertechnik-Realtime Aufgaben für die Roboterbewegung

Einige dieser Teilgebiete der Robotik können auch als Grundlagen der 3D- Computeranimation betrachtet werden. So ist die Mathematik und Geometrie die Grundvoraussetzung für die Bewegung virtueller Objekte in einem dreidimensionalen Raum einer 3D- Software. Mechanische Lösungen und steuerungstheoretische Methoden können in vielerlei Hinsicht auf die

¹¹ (Bruns, et al., 2005 S. 377)

¹² (Husty, et al., 1997 S. 415)

¹³ (Husty, et al., 1997 S. 414)

Computergrafik übertragen werden. Beispielsweise werden Methoden zur Bewegung und Animation komplexer Strukturen benötigt. Oder es müssen Lösungen zur Simulation virtueller physikalischer Systeme gefunden werden. Ein Großteil der in der Robotik definierten Grundsätze der Mathematik, Geometrie und Physik gelten genau so für die Computergrafik, was im weiteren Verlauf dieses Kapitels gezeigt wird.

2.2 Koordinatensysteme und Koordinatentransformationen

2.2.1 Koordinatensysteme

Definition Euklidischer Raum:

„Ein nach dem griechischen Mathematiker EUKLID (330? - 275? v. Chr.) benannter Begriff zur Beschreibung eines gewöhnlichen zwei-oder dreidimensionalen bzw. eines höher dimensionierten Raumes.“¹⁴

Der Euklidische Raum ist die Grundlage des kartesischen Koordinatensystems. Er dient dazu Bewegungen mit Hilfe von Vektoren eindeutig zu beschreiben.

Definition Koordinatenachsen und Nullpunkt:

„Um die Lage eines Punktes in der Ebene eindeutig festzulegen, sind zwei Zahlengeraden notwendig. Man ordnet die Zahlengeraden stets so an, dass ihre Nullpunkte zusammenfallen. Die Zahlengeraden werden Achsen des Koordinatensystems oder Koordinatenachsen genannt und als x- oder Abszissenachse und als y- oder Ordinatenachse bezeichnet. Der gemeinsame Nullpunkt, also der Schnittpunkt der beiden Geraden, heißt Koordinatenursprung oder Nullpunkt. Auf jeder der beiden Geraden wird vom Koordinatenursprung aus eine positive und eine negative Orientierung sowie ein Maßstab festgelegt.“¹⁵

Definition kartesisches Koordinatensystem:

„In einem kartesischen (rechtwinkligen) Koordinatensystem stehen die Koordinatenachsen senkrecht aufeinander, die Achsen haben den gleichen Maßstab und bilden ein so genanntes Rechtssystem: Die x- Achse geht durch Drehung um einen rechten Winkel im mathematisch positiven Sinne (linksdrehend, entgegen dem Uhrzeigersinn) in die y- Achse über. Ein beliebiger Punkt P der Ebene kann dann durch seine kartesischen Koordinaten beschrieben werden: $P(x/y)$ mit x als Abszisse und y als Ordinate. Dieses Koordinatensystem

¹⁴ (Eckstein, 2006 S. 184)

¹⁵ (Kemnitz, 2006 S. 241)

ist benannt nach dem französischen Mathematiker René Descartes, genannt Cartesius (1596-1650).¹⁶

Definition kartesisches Koordinatensystem in der Computergrafik:

In der Computergrafik wird ein 3- dimensionales Euklidisches Koordinatensystem verwendet, dessen 3 senkrecht aufeinander stehende Achsen mit x, y und z bezeichnet werden. Standardmäßig sitzt der Betrachter (auch Augenpunkt genannt) im Ursprung ($x=0, y=0, z=0$), die positive x- Achse zeigt bzgl. des Beobachters bzw. des Bildschirms nach rechts, die positive y- Achse zeigt nach oben und die positive z- Achse zeigt in Richtung des Beobachters, d.h. sie steht senkrecht auf dem Bildschirm in Richtung des Augenpunkts. Dadurch ist ein so genanntes „rechtshändiges“ Koordinatensystem definiert, bei dem der Daumen der rechten Hand die positive x- Achse repräsentiert, der Zeigefinger die positive y- Achse und der auf den beiden anderen senkrecht stehende Mittelfinger die positive z- Achse.¹⁷

Trotz der Gültigkeit dieser Definition kann es in den verschiedenen 3D- Programmen davon Abweichungen geben. In Autodesk® 3ds Max® wird beispielsweise ein linkshändiges Koordinatensystem verwendet.

In der 3D- Computergrafik kann in mehrere Koordinatensysteme unterschieden werden:

- Weltkoordinatensystem (WKS): Referenzkoordinatensystem, dass für eine gesamte 3D- Szene gilt und den Raum innerhalb dieser Szene dimensioniert
- Objektkoordinatensystem (LKS): lokales Koordinatensystem in dem 3D- Objekte definiert werden.
- Projektionskoordinatensystem: Koordinatensystem, dass nach einer perspektivischen oder parallelen Projektionstransformation gilt
- Bildschirmkoordinaten: Koordinatensystem am Ende der Transformationskette, das die Szene als sichtbares Bild in einem Fenster darstellt.

¹⁶ (Kemnitz, 2006 S. 241-242)

¹⁷ (Nischwitz, 2007 S. 81)

2.2.2 Koordinatentransformation

Translation

Um Bewegungen beschreiben zu können, wird ein euklidischer, kartesischer Raum in zwei Exemplaren ausgebildet. Ein Exemplar ist der feste Bezugsraum (Rastraum) Σ_0 . In diesem wird das zweite Exemplar, der Gangraum Σ' (auch Referenzkoordinatensystem) bewegt. Ist $U_0 \in \Sigma_0$ Koordinatenursprung eines Koordinatensystems und $P \in \Sigma_0$ eine Position in diesem System, dann wird der Punkt $p \in \Sigma_0$ durch den Ortsvektor $\vec{p} = \overrightarrow{U_0 P}$ beschrieben, während der Bildpunkt $p' \in \Sigma'$ durch $\overrightarrow{U_0 P'} = p'$ festgelegt wird.

Definition Translation: Eine spezielle, eigentliche Bewegung ist die Abbildung $p \rightarrow p'$ definiert durch $p' = p + \vec{T}_p$ und heißt Translation (Schiebung), wobei \vec{T}_p einen konstanten Richtungsvektor bezeichnet. Die Orientierung der Winkel bleibt ersichtlich erhalten.¹⁸

In einem dreidimensionalen, kartesischen Koordinatensystem kann die Translation des Punktes $p = x, y, z$ um einen Richtungsvektor $\vec{T}_p = \vec{T}_x, \vec{T}_y, \vec{T}_z$ deshalb in der Form:

$$\begin{aligned}x' &= x + \vec{T}_x \\y' &= y + \vec{T}_y \\z' &= z + \vec{T}_z\end{aligned}$$

geschrieben werden.¹⁹

¹⁸ (Husty, et al., 1997 S. 271-272)

¹⁹ (Nischwitz, 2007 S. 87)

Rotation

Wählt man einen konstanten Richtungsvektor $T_p = 0$ so gilt:

$$p' = p + \vec{T}_p \Rightarrow p' = p$$

Der Punkt p heißt somit Fixpunkt p_F einer Abbildung.

Definition Rotation: Eine eigentliche Bewegung mit einem Fixpunkt p_F bei der die Orientierung der Winkel sich ändert, heißt Rotation um den Punkt p_F .²⁰

Der Fixpunkt, um den eine Rotation erfolgt wird auch Drehpunkt genannt. In dieser Arbeit wird im Folgenden der Drehpunkt auch als Pivotpunkt bezeichnet. Abgeleitet vom französischen Wort für Zapfen (pivot) wird dieser Begriff (als „pivotpoint“ oder nur „pivot“) in der englischen Sprachversion von Autodesk® 3ds Max® verwendet.

Die Orientierung eines Punktes im dreidimensionalen Euklidischen Raum kann durch mehrere Verfahren beschrieben werden. Am häufigsten verwendet werden die so genannten „Euler-Winkel“. Damit kann die Orientierung eines Referenzkoordinatensystems Σ' in einem Bezugsraum Σ_0 mit nur drei Parametern definiert werden.²¹ Die Euler Winkel beschreiben eine nacheinander ausgeführte Rotation:

ψ um die z- Achse des Bezugssystems Σ_0

θ um die x- Achse des durch ψ entstandenen Systems Σ'

φ um die y- Achse des durch θ entstandenen Systems Σ''

²⁰ (Husty, et al., 1997 S. 271-272)

²¹ (Weber, 2007 S. 37)

Als Vektor zusammengefasst gilt somit²²:

$$\vec{\Pi}Euler = \begin{pmatrix} \psi \\ \theta \\ \varphi \end{pmatrix}$$

Skalierung

Definition: Eine Dimensionsänderung einer beliebigen Achse eines Koordinatensystems um einen Streckungsfaktor ϖ heißt Skalierung. Gilt dabei $\varpi > 1$ so ist die Skalierung eine Streckung. Ist $\varpi < 1$ so heißt die Skalierung Stauchung. Ist der Streckungsfaktor $\varpi = 0$ so verschwindet die jeweilige Dimension. Ist $\varpi = 1$ so bleibt die Dimension unverändert.

²² (Husty, et al., 1997 S. 530)

2.3 Hierarchien

2.3.1 Allgemeine Definition

Hierarchie bezeichnet ein System von Elementen, die einander über- bzw. untergeordnet sind, so dass jedem Element nur höchstens ein anderes unmittelbar übergeordnet ist. (...) Hierarchien werden auch allgemein zur Ordnung von Objekten zum Beispiel in einer Systematik verwendet. Formal lässt sich die Struktur einer Hierarchie als Baum beschreiben. Bildlich werden Hierarchien häufig mit einer Pyramide verglichen. Die Elemente lassen sich meist in Ebenen anordnen, wobei jedes Element (bis auf das oberste) nur mit einem (Monohierarchie) oder mehreren (Polyhierarchie) Elementen der jeweils nächst höheren Ebene verbunden ist.(...)²³

2.3.2 Hierarchien in der 3D- Computeranimation

„Die meisten Modelle in einer dreidimensionalen Szene sind keine monolithischen Modelle, sondern komplexe Objekthierarchien, die sich aus mehreren Objekten zusammensetzen.“²⁴

Diese so genannten hierarchischen Modelle lassen sich in 3D- Animationswerkzeugen (wie z.B. Autodesk® 3ds Max®) mit einer hierarchischen Verknüpfung der entsprechenden Objekte aufbauen. Eine hierarchische Verknüpfung von Objekten ist stets gerichtet, vom übergeordneten zum untergeordneten Objekt.

„Sobald ein Objekt einem anderen hierarchisch untergeordnet wurde, dient als Koordinatensystem für das untergeordnete Objekt nicht mehr das Welt-Koordinatensystem, sondern das Koordinatensystem des übergeordneten Objekts.“²⁵

²³ (Deutsche Enzyklopädie, 2008)

²⁴ (Bruns, et al., 2005 S. 389)

²⁵ (Bruns, et al., 2005 S. 389)

Wird das Überobjekt transformiert, so verändert das Unterobjekt seine Position, Ausrichtung oder Skalierung in Bezug auf das Weltkoordinatensystem. Position, Ausrichtung, und Skalierung im Verhältnis zum Koordinatensystem des übergeordneten Objekts bleiben dabei gleich. Transformationen des Unterobjekts haben hingegen keine Auswirkungen auf das Übergeordnete. Das Unterobjekt verändert aber seine Ausrichtung, Position oder Skalierung relativ zum übergeordneten Koordinatensystem. Das in einer Objekthierarchie höchste Objekt wird als Wurzelobjekt (engl. Root) bezeichnet. Diesem sind keine weiteren Objekte übergeordnet. Transformationen, die am Wurzelobjekt vorgenommen werden, wirken sich auf alle seine Unterobjekte aus.

2.4 Kinematik in 3D- Animationen

Definition Kinematik: „Die Kinematik beschreibt die Bewegungen der Körper, ohne dabei auf die Kräfte als die Ursache für die verschiedenen Bewegungsarten einzugehen.“²⁶

„Kinematik in der 3D- Computergrafik ist eine Animationstechnik, die auf dem Hierarchieverhalten von Gelenken und auf deren mathematischen Berechnungen basiert. Dieser Ansatz entstammt der Robotik. Hier wurden bereits sehr früh Methoden entwickelt, um eine exakte Positionierung von Roboterarmen zu kontrollieren.“²⁷

2.4.1 Kinematische Ketten

Für die Definition einer kinematischen Kette innerhalb eines zweidimensionalen Raumes kann eine Definition aus der Robotik verwendet werden, welche lautet:

„Unter einer (...) kinematischen Kette versteht man ein System von n Gliedern $\{\Sigma_0, \Sigma_1, \dots, \Sigma_{n-1}\}$, die sich alle in oder parallel zu einer Ebene s bewegen können, wobei jedes Σ_i mit mindestens einem Σ_j über ein Gelenk g_{ij} verbunden ist. Sind n Glieder vorhanden, so heißt die kinematische Kette n - Gliedrig.“²⁸

Diese Definition besitzt auch im dreidimensionalen Raum Gültigkeit. Nur muss hier ergänzt werden, dass sich alle Glieder in einem dreidimensionalen Raum bewegen können.

Eine weitere Definition, die an dieser Stelle nur zeigen soll, wie alt diese Grundlagen der heutigen Computeranimation sind, ist die Definition von Reuleaux von 1875:

„Kinematische Kette entsteht durch Aneinanderreihung von Körpern, Gliedern, welche durch kinematische Elementenpaare beweglich verbunden sind. Die kinematische Kette ist

²⁶ (Dobrinski, et al., 2007 S. 17)

²⁷ (Kunst Universität Linz, 2009)

²⁸ (Husty, et al., 1997 S. 4)

demnach eine durch kinematische Elementenpaare bedingte Verbindung von Gliedern, bei welcher jedes Glied in seiner Beweglichkeit gegen jedes andre Glied beschränkt wird. Wenn kein Glied einer kinematischen Kette mit mehr als zwei andern Gliedern verbunden ist, so heißt sie einfach, andernfalls zusammengesetzt; wenn jedes Glied mit wenigstens zwei andern Gliedern verbunden ist, so ist die kinematische Kette geschlossen und andernfalls offen. Vollzieht jedes Glied einer kinematischen Kette eine bestimmte Bewegung in bezug auf jedes andre Glied, dann heißt die kinematische Kette eine zwangsläufige, und es bewegen sich die Punkte eines jeden Gliedes in bezug auf jedes andre Glied im allgemeinen in bestimmten Bahnen.“²⁹

Ähnliche Definitionen findet man in Standardwerken der Computeranimation. Hier wird davon ausgegangen, dass eine bestimmte Anzahl an Gelenken mit lokalen Koordinatensystemen existiert. Wird nun eines dieser Koordinatensysteme als Basis definiert, so ergibt sich eine Hierarchie von Koordinatensystemen. Die Basis bildet dann das Wurzelobjekt der Hierarchie. Die einzelnen Koordinatensysteme können nun relativ zueinander definiert werden. Ein Pfad vom Wurzelobjekt zu einem bestimmten Segment der Hierarchie wird als kinematische Kette bezeichnet.³⁰ Diese Kette ist die Basis der direkten Kinematik.

2.4.2 Direkte Kinematik (Vorwärtskinematik)

Es sei eine n -Gliedrige kinematische Kette gegeben, dessen Basis als Wurzel und dessen hierarchisch niedrigstes Element als Endeffektor bezeichnet wird. Die Position des Endeffektors wird bestimmt durch die Multiplikation der Transformationen innerhalb der Kette, gerichtet von der Wurzel zum Endeffektor. Die einzelnen Transformationen repräsentieren die relativen Stellungen der Gelenkkoordinatensysteme. Das bedeutet, dass die Lage des Endeffektors von den einzelnen Drehwinkeln der Gelenke, der so genannten Gelenkvariablen abhängig ist. Diese Abhängigkeit auszudrücken, ist die Aufgabe der direkten Kinematik. Somit wird die Position einer Gelenkverbindung oder des Endpunktes einer kinematischen Kette durch die Funktion der Gelenkvariablen $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ bestimmt. Verdeutli-

²⁹ (Reuleaux, 1875 S. 49)

³⁰ (Jackèl, et al., 2006 S. 38)

chen lässt sich dieser Sachverhalt anhand eines Beispiels. Gegeben sei eine kinematische Kette bestehend aus drei Segmenten. Der Drehpunkt von Segment 1 befindet sich im Koordinatenursprung des Weltkoordinatensystems. Die Drehpunkte der beiden anderen Segmente werden als x_{1join}, y_{1join} und x_{2join}, y_{2join} bezeichnet. Damit kann die Koordinatentransformation der Segmente mit folgenden Gleichungen beschrieben werden:

$$\begin{aligned} [x_1^{(1)} \ y_1^{(1)}] &= [\mathbf{Rot}(\alpha_1)][x_1 \ y_1]^T, \\ [x_2^{(1)} \ y_2^{(1)}] &= [\mathbf{Trans}(x_{1join}^{(1)} \ y_{1join}^{(1)})][\mathbf{Rot}(\alpha_2)][\mathbf{Rot}(\alpha_1)][x_2 \ y_2]^T, \\ [x_3^{(1)} \ y_3^{(1)}] &= [\mathbf{Trans}(x_{2join}^{(1)} \ y_{2join}^{(1)})][\mathbf{Rot}(\alpha_3)][\mathbf{Rot}(\alpha_2)][\mathbf{Rot}(\alpha_1)][x_3 \ y_3]^T. \end{aligned}$$

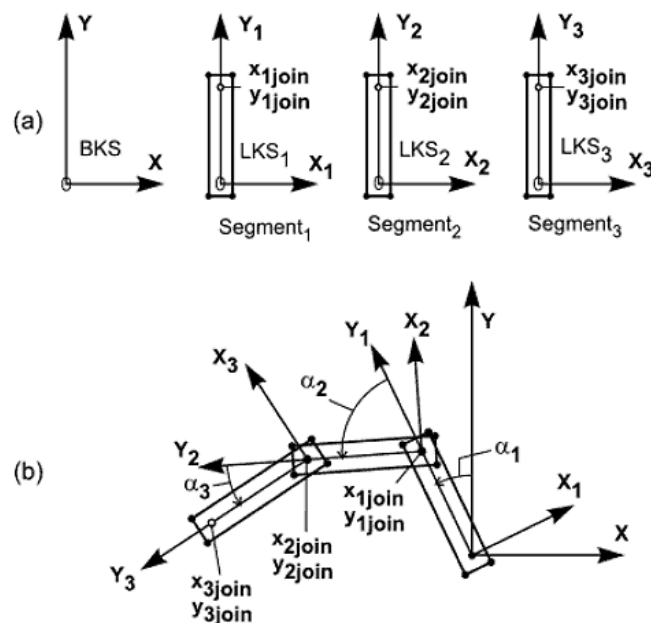


Abbildung 3: Direkte Kinematik³¹

Zu Abbildung 3, Direkte Kinematik: (a) Geometrische Schreibung der Segmente einer kinematischen Kette innerhalb der lokalen Koordinatensysteme, (b) Darstellung der transformierten Segmente innerhalb des Weltkoordinatensystems.

³¹ (Jackèl, et al., 2006 S. 39)

Nachteile der direkten Kinematik in der Animationspraxis:

- um die Position des Endeffektors festzulegen, muss in einer 3D- Software jedes Gelenk einzeln rotiert (animiert) werden > erhöhter Zeit- und Arbeitsaufwand
- problematische Animation von realistischen menschlichen Laufbewegungen da selbst geringste Abweichungen vom bekannten Bewegungsverhalten wahrgenommen und als fehlerhaft registriert werden
- schwierige Animation von Interaktion mit anderen Objekten (z.B. mit Boden beim Laufen) da Endposition erst fest steht, wenn die einzelnen Segmente bewegt wurden > fast keine Animation von linearen Bewegungsbahnen möglich*
- erhöhter Aufwand bei der Nachbearbeitung von Bewegungskurven, da für jedes animierte Gelenk ein Keyframe³² erzeugt wird

**Lineare Bewegungsbahnen sind natürlich durch Translation des Wurzelobjektes im WKS-Raum möglich, jedoch wird an dieser Stelle das Verhalten des Endpunktes bei Rotation der einzelnen Segmente untersucht.*

Vorteile der direkten Kinematik in der Animationspraxis:

- ist einfach zu handhaben, da kein aufwändiges Setup eingerichtet werden muss. Eine kinematische Kette kann sofort animiert werden
- durch die einzelne Transformation der Gelenke sind Bewegungsabläufe beeinflussbarer und können individueller gestaltet werden
- aufgrund des relativ geringen Rechenaufwandes zur Bestimmung der Gelenkvariablen ist direkte Kinematik weniger fehleranfällig
- da fast keine Animation von linearen Bewegungsbahnen möglich ist, verlaufen Animationen mit direkter Kinematik sehr oft auf nicht linearen Bahnen die Kreis- oder Parabelförmig sein können > somit können Bewegungen mit weniger Aufwand weicher, runder und gleichmäßiger animiert werden³³

³² Schlüsselbild

³³ (Jackèl, et al., 2006 S. 13)

2.4.3 Inverse Kinematik

In der Robotik lautet eine Definition für die Aufgabe der inversen Kinematik:

„Diese Aufgabe ist die Umkehrung der vorherigen Aufgabe (direkte Kinematik). Eine bestimmte Lage des Endeffektors ist gegeben und es sind solche Werte der Gelenkvariablen gesucht, für die der Endeffektor die vorgegebene Lage einnimmt.“³⁴

Weiter heißt es, dass die Lösung dieser Aufgabe der inversen Kinematik für einen allgemeinen sechsachsigen Roboter auf eine algebraische Gleichung 16. Grades führt. In der Computergrafik gelten für die inverse Kinematik die gleichen Bedingungen, da die Robotik als Grundlage der Computeranimation betrachtet wird. So heißt es:

„Im Gegensatz zur direkten Kinematik,... geht man bei der inversen Kinematik (IK) von einer vorgegebenen Änderung der Position und Orientierung des Endeffektors aus, und bestimmt (...) die hierzu notwendigen Veränderungen der Gelenkwinkel...“³⁵

Da die Gelenkvariablen in der Praxis nicht durch analytische Lösungen ermittelt werden können, muss mit Hilfe von numerischen Verfahren approximiert werden. Aufgrund der verwendeten Näherungsgleichungen entstehen Ungenauigkeiten, wodurch erneute Approximationen erforderlich werden. Dadurch kann sich der Rechenaufwand zur Bestimmung der Gelenkvariablen erheblich vergrößern.

Nachteile

- komplexe Berechnungen und Approximationen können vermehrt Fehler hervorrufen
- besonders bei kinematischen Ketten mit vielen Segmenten ist inverse Kinematik nur bedingt brauchbar, weil dadurch der Rechenaufwand noch größer wird
- bei Implementation von inversen kinematischen Ketten ist ein sehr genaues und sorgfältiges Setup zwingend nötig

³⁴ (Husty, et al., 1997 S. 415-416)

³⁵ (Jackèl, et al., 2006 S. 45)

- die translatorische Koordinatentransformation des Endeffektors verläuft auf linearen Bahnen, was Bewegungsabläufe unnatürlich erscheinen lassen kann

Vorteile der inversen Kinematik in der Animationspraxis

- Bewegungsvorgänge sind intuitiv animierbar
- Interaktionen mit anderen Objekten sind unkompliziert und wesentlich kontrollierter zu steuern
- deshalb besonders gute Eignung für Lauf- und Schrittanimation.
- Keyframes werden nur beim Endeffektor erstellt
- Animation ist weniger zeitaufwändig, da nur der Endeffektor animiert werden muss

2.5 Rigging (Animationsvorbereitung)

Beim Rigging werden Steuerobjekte in eine zu animierende Figur gebaut, um den Animationsprozess für komplexe Bewegungen zu vereinfachen und somit für den Benutzer komfortabler zu machen.

„Um die Figur zu einer großen Bandbreite von Bewegungen (...) zu befähigen, hat es sich als vorteilhaft erwiesen, ein Gelenksystem für die Animationssteuerung innerhalb des Figurobjekts einzurichten (...).“³⁶

„Der Vorgang des Einrichtens von anatomiebezogenen Steuerelementen wird im amerikanischen Sprachgebrauch als character setup, rigging oder character rig bezeichnet, während sich im deutschen Sprachgebrauch der Begriff Animationsvorbereitung durchsetzt.“³⁷

Das „character rig“ (auch Hilfsstruktur) besteht aus einem skelettartigen Gelenksystem. Das Gelenksystem ist eine Reihe von Einzelteilen verbunden durch Gelenke und wird als kinematisches Modell bezeichnet.³⁸ Ein klassisches Beispiel für ein komplexes kinematisches Modell ist der menschliche Bewegungsapparat. Dieser lässt sich in mehrere kinematische Ketten unterteilen, da sich die Gliedmaßen unabhängig voneinander bewegen können. Somit kann für ein Character Rigging eine Hierarchische Struktur bestehend aus mehreren kinematischen Ketten entworfen werden, deren Endeffektoren unabhängig voneinander beweglich sind. Alle kinematischen Ketten sind dabei jedoch einem Wurzel-Objekt untergeordnet. Um den menschlichen Bewegungsapparat nachzuahmen, existieren verschiedene Ansätze. Die am häufigsten verwendete, welche auch in der Fachliteratur fast ausschließlich verwendet wird, ist die „Basic Hierarchy of Human Body“³⁹ bzw. der „Body Tree“⁴⁰, dargestellt in Abbildung 4.

³⁶ (Kohlmann, 2007 S. 101)

³⁷ (Kohlmann, 2007 S. 101)

³⁸ (Bruns, et al., 2005 S. 390)

³⁹ (Maestri, 1996 S. 29)

⁴⁰ (Jackèl, et al., 2006 S. 57)

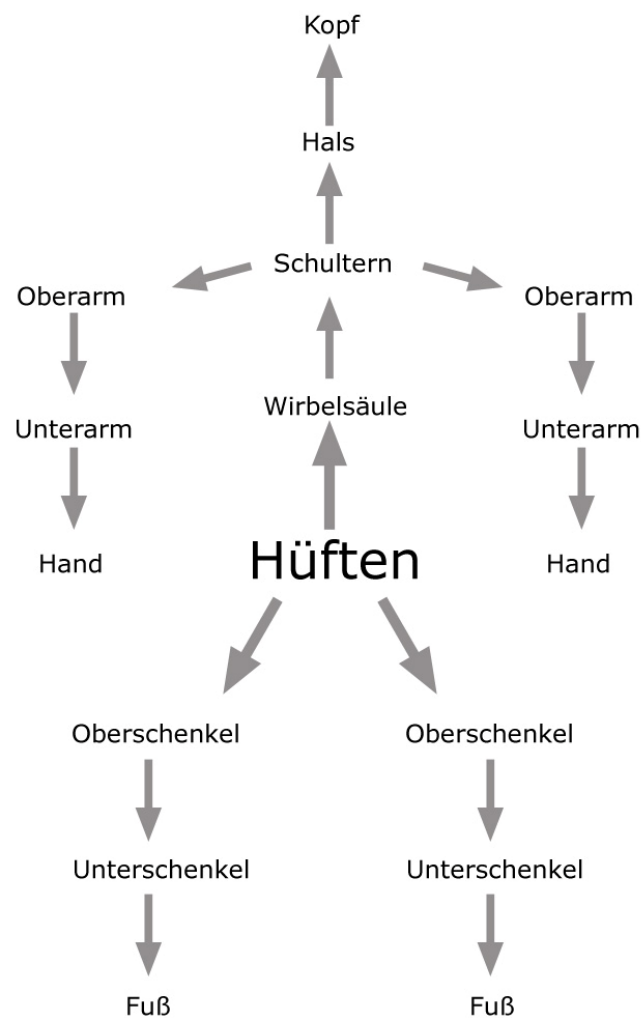


Abbildung 4: „Basic Hierarchy of Human Body“

Die Hüfte ist das Wurzelobjekt. Alle kinematischen Ketten sind mit diesem verknüpft, das heißt diesem untergeordnet. Insgesamt besteht die Hierarchie aus fünf kinematischen Ketten:

- rechtes Bein
- linkes Bein
- rechter Arm
- linker Arm
- Wirbelsäule mit Hals und Kopf

Andere Varianten für eine Hierarchische Struktur des menschlichen Skeletts sind ähnlich und variieren meist nur in der Definition des Wurzelobjektes. So kann beispielsweise auch der Kopf als hierarchisch oberstes Element definiert werden. Da in der Fachliteratur fast ausschließlich die in Abbildung 3.2 dargestellte Form verwendet wird, ist sie auch Gegenstand dieser Arbeit.

Um ein vollständiges Rigging durchzuführen, sind mehrere Arbeitsschritte notwendig. Diese können sein:

- Analyse, der zu animierenden Bewegungen (Art und Umfang)
- Festlegung von Gelenkdrehpunkten
- Einrichtung von kinematischen Ketten
- Implementierung inverser Kinematik
- Einrichtung eines Benutzerinterface zur schnelleren Animation der einzelnen kinematischen Ketten

In den meisten Fällen wird das Rigging für ein durchgängiges Polygonmodell entworfen. Ohne eine Steuerstruktur müsste das Modell durch Koordinatentransformation der einzelnen Polygonpunkte bewegt und animiert werden. Wird eine Steuerstruktur für so ein Polygonmodell erstellt, so muss es mit diesem in Verbindung gebracht werden. Dieser Arbeitsschritt wird als Skinning bezeichnet. Die Bewegung der Steuerstruktur hat dann eine Verformung des Polygonmodells zur Folge. Diese Arbeit befasst sich mit dem Rigging des menschlichen Skeletts. Da sich die Knochen des Skeletts in der Regel nicht verformen, wird auf das Skinning nicht weiter eingegangen. Wie das vorhandene Skelettmodell der Firma Zygo te geriggt wird, wird in Kapitel 6 erläutert.

2.6 Definition von Untersuchungsparametern

Dieses Kapitel bezieht sich auf die ersten zwei möglichen Arbeitsschritte des Riggings:

- Analyse, der zu animierenden Bewegungen (Art und Umfang)
- Festlegung von Gelenkdrehpunkten

2.6.1 Pivotpunkte

Für diese Arbeit ist es notwendig für jedes Knochenobjekt des Skelettmodells den Pivotpunkt und dessen Ausrichtung zum Welt- Koordinatensystem zu ermitteln. Dazu wird in Kapitel 4. „Anatomie des menschlichen Skeletts“, die funktionelle Anatomie der menschlichen Gelenke untersucht. Für jedes Gelenk im menschlichen Körper wird der Gelenkdrehpunkt ermittelt um ihn als Pivotpunkt des jeweiligen 3D- Objektes zu übertragen

2.6.2 Freiheitsgrade der Translation und Rotation

Die Gelenke des menschlichen Körpers sind in ihren Bewegungsfreiheiten meist stark eingeschränkt. Diese Beschränkungen werden durch Muskeln, Sehnen, Bänder oder durch Gelenk- und Knochenformen verursacht. Sie müssen untersucht und auf das 3D- Modell übertragen werden, um die anatomiekonforme Animation des Skeletts zu ermöglichen. Für ein Objekt im dreidimensionalen Raum gilt:

„Ein freier Körper besitzt im Raum insgesamt sechs Freiheitsgrade. Es werden also insgesamt sechs Parameter oder Koordinaten zu seiner eindeutigen Lagebeschreibung benötigt. Die Lage eines Körpers setzt sich zusammen aus seiner Position und seiner Orientierung.“⁴¹

⁴¹ (Husty, et al., 1997 S. 530)

Für ein Objekt innerhalb einer kinematischen Kette gilt als Rotations-Freiheitsgrad die maximale Winkeländerung in positiver und negativer Richtung des lokalen Koordinatensystems. Die Objekte sind in der Regel (auch im menschlichen Körper) durch Rotationsgelenke miteinander verbunden. In einem Rotationsgelenk gibt es keine Translationen. Somit kann eine translatorische Bewegung eines Objektes oder Punktes nur durch Rotation in einem übergeordneten Gelenk erfolgen. Deshalb ist der Translations-Freiheitsgrad abhängig vom Rotations-Freiheitsgrad der übergeordneten Objekte. Zu Verdeutlichung zeigt Abbildung 5 diesen Sachverhalt.

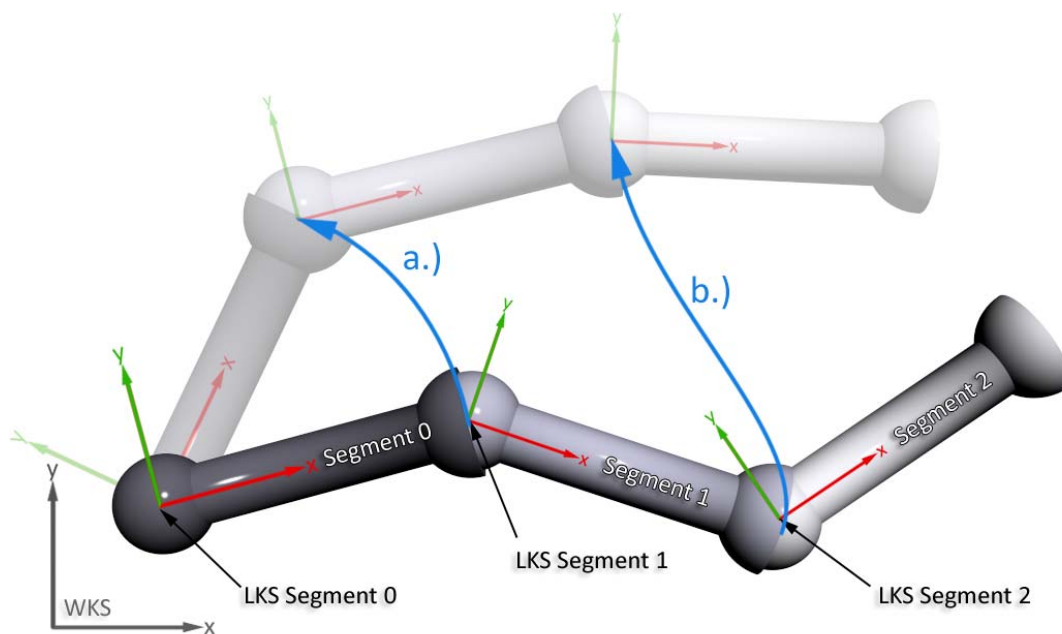


Abbildung 5: Translationen innerhalb einer kinematischen Kette

Zu Abbildung 5:

- a.) aus der Rotation des Segments 0 folgt die Translation von Segment 1
- b.) aus den Rotationen von Segment 0 u. 1 folgt die Translation von Segment 2

Im menschlichen Körper entsprechen die Freiheitsgrade den maximal möglichen Bewegungsausmaßen eines Gelenks. Ausgangspunkt (Nullpunkt des Bewegungsausmaßes) ist dabei die so genannte Normalstellung. Die Normalstellung entspricht der natürlichen Gelenkstellung bei entspannten Muskeln.

2.6.3 Kinematische Ketten

Der menschliche Bewegungsapparat ist wesentlich komplexer als die Darstellung der „Basic Hierarchy of Human Body“. Beispielsweise ist jeder einzelner Finger eine kinematische Kette welche der Hand untergeordnet ist. Für das Vorhaben eines anatomiekonformen Riggings ist deshalb eine Analyse aller kinematischen Ketten im menschlichen Skelett erforderlich.

2.6.4 Tabellarische Zusammenfassung der Untersuchungsparameter

Anatomische Eigenschaften der menschlichen Gelenke	Übertragene Parameter auf das 3D-Modell
Gelenkdrehpunktposition	Pivotpunkt des dem Gelenk untergeordneten Knochenobjektes
Gelenkausrichtung Normalstellung	Ausrichtung des lokalen Koordinatensystems eines Knochenobjektes
Freiheitsgrade der Gelenkdrehachsen	maximale Winkeländerungen des lokalen Koordinatensystems eines Knochenobjektes
Freiheitsgrade möglicher Verschiebungen und Gleitbewegungen	Definition eines Bewegungspfades, auf den Translationen des lokalen Koordinatensystems eines Knochenobjektes beschränkt sind

Tabelle 1: Zusammenfassung der Untersuchungsparameter

3 Anatomie des menschlichen Skeletts

3.1 Allgemeine Anatomie des menschlichen Skeletts

Das Knochenskelett des menschlichen Körpers gliedert sich in die drei Bereiche: Stammskelett, obere und untere Extremitäten. Das Stammskelett umfasst die Knochen des Rumpfes und des Schädels. Obere und untere Extremitäten sind beim Mensch die Arme mit Händen und die Beine mit Füßen.⁴²

Das Kopfskelett des Menschen lässt sich in zwei Bereiche unterteilen: den Hirnschädel [*Neurocranium*], der das Gehirn unmittelbar umschließt, und den Gesichtsschädel [*Viscerocranium*]. Der Hirnschädel setzt sich aus äußeren und inneren Knochen zusammen [*Ossa cranii*]. Zu den äußeren zählen das Stirnbein [*Os frontale*] und das paarige Scheitelbein [*Os parietale*] welches durch eine Spalte getrennt das Schädeldach formt. Des Weiteren gehört dazu der hintere und untere Abschnitt des Schädels, genannt Hauptbein, sowie das paarige Schläfenbein [*Os temporale*], das die Flanken des Schädels definiert. Die inneren Knochen sind das Siebbein [*Os ethmoidale*], dies ist beteiligt an der Nasenscheidewand, das Keilbein [*Os sphenoidale*], das einen Großteil der Hirnschädelbasis ausmacht, sowie ein Teil des Hinterhauptbeines. Der Gesichtsschädel setzt sich aus folgenden Knochen [*Ossa faciei*] zusammen: dem Nasenbein [*Os nasale*], dem paarigen Tränenbein [*Os lacrimale*], welches die Augenhöhlen nach unten hin abschließt, dem Jochbein [*Os zygomaticum*], der paarigen Oberkieferknochen [*Maxillae*], den Unterkieferknochen [*Mandibulae*], dem Gaumenbein [*Os palatinum*], dem Zungenbein [*Os hyoideum*] und der Nasenscheidewand [*Septum nasi*]. Der wichtigste Teil des menschlichen Skeletts ist die in der Regel aus 33 Wirbelknochen [*Vertebrae*] bestehende Wirbelsäule [*Columna vertebralis*]. Der obere Teil ist mit dem Schädel verbunden und besteht aus sieben Halswirbeln. Danach folgen zwölf Brustwirbel, an denen jeweils die Rippen [*Costae*] befestigt sind. Diese bilden die Rückseite des Brustkorbes [*Thorax*]. Der untere Teil wird durch fünf Lendenwirbel, dem aus fünf zusammengewachsenen Wirbeln bestehende Kreuzbein [*Os sacrum*] und dem ebenfalls aus drei bis vier verschmolzenen Knochen geformte Steißbein [*Os coccygis*] gebildet. Vor der Geburt eines Menschen, beschreibt die Wirbelsäule nur eine einzige nach außen gebogene Kurve. Nach der Geburt bildet sie im Brust- und Lendenbereich zwei nach vorn gerichtete konkave Bö-

⁴² (OTC media GmbH, 2009)

gen, die bei normaler Entwicklung um weitere ausgleichende Kurven in Hals- und Lendenbereich erweitert werden. Aufgrund dieser „S-förmigen“ Anatomie wird eine Widerstandskraft erreicht, die bei gerader Aufreihung der Wirbel nicht gegeben wäre. Außerdem kann durch diese Formung die Masse des Körpers optimal über den Füßen balanciert werden, was eine der wichtigsten Voraussetzungen für das aufrechte Gehen ist. Untereinander besitzen die Wirbel nur einen sehr geringfügigen Bewegungsgrad. In der Gesamtheit ihrer Knochen ist die Wirbelsäule jedoch eine sehr flexible Kette. Die Verbindungen der Wirbel sind die Bandscheiben [*Discus intervertebralis*]. Diese polstern nicht nur das Rückgrat, sondern verformen sich auch in Abhängigkeit der Bewegung. Zwischen Hals und Brustwirbeln befindet sich der Schultergürtel [*Cingulum membri thoracici*] bestehend aus den Schlüsselbeinen [*Claviculae*] und den Schulterblättern [*Scapulae*] welche durch das Schultergelenk [*Articulatio humeri*] in Verbindung mit dem Oberarmknochen [*Humerus*] stehen. Durch das Ellenbogengelenk [*Articulatio cubiti*] ist der Oberarm mit den beiden Unterarmknochen, der Elle [*Ulna*] und der Speiche [*Radius*], verbunden. Den Endabschnitt des Armes bildet die Hand [*Manus*]. Sie besteht insgesamt aus 27 Knochen. Sieben Handwurzelknochen [*Ossa carpalia*] angeordnet in zwei Reihen fügen sich in die flache Gelenkpfanne des Unterarmes ein und formen somit das Handgelenk [*Articulatio carpi*]. Daran befinden sich fünf Mittelhandknochen [*Ossa metacarpalia*], die in Verlängerung mit 3 Knochen die Finger [*Digiti*] und mit 2 Knochen den Daumen [*Pollex*] bilden. Das Kreuzbein formt zusammen mit den beiden Hüftbeinen [*Ossa coxae*] das stabile Becken [*Pelvis*] eines Menschen. Aufgrund der Starrheit der einzelnen Knochenverbindungen, agiert das Becken bei sämtlichen Bewegungen als eine Einheit. Die Gewichtskraft des Rumpfes wird über Kreuzbein und Hüftbeine auf die Oberschenkelknochen und somit auf die Beine übertragen. Die gleiche Weise der Kraftübertragung gilt für umgekehrte Richtung vom Bein zum Rumpf. Im Becken liegt außerdem der Körperschwerpunkt des Menschen. In der Anatomie des Beckens besteht außerdem ein Unterschied zwischen Mann und Frau. Die wichtigsten Differenzen zeigen sich beim weiblichen durch stärkere Wölbungen, einen breiteren Bau und leichtere Knochen. Auswirkungen auf den grundsätzlichen Bewegungsablauf sind jedoch nicht erkennbar. Direkt am Hüftgelenk [*Articulatio coxae*] angesetzt ist der Oberschenkelknochen [*Os femoris*]. Dieser ist über das Kniegelenk [*Articulatio genus*] mit Kniescheibe [*Patella*] mit den beiden Unterschenkelknochen, dem Schienbein [*Tibia*] und dem Wadenbein [*Fibula*], verbunden. Am unteren Ende des Beines treffen die Unterschenkelknochen im oberen Sprunggelenk [*Articulatio talocalcanealis*] auf das Sprungbein [*Talus*], welches Teil der Fußwurzel ist. Der Fuß [*Pes*] als unterer Teil des Beines besteht aus 26 Knochen und ähnelt entfernt der Anatomie der Hand. Der Fußrücken und die Ferse setzen sich aus sieben dicken, kurzen Fußwurzelknochen zusam-

men. Vom Fußrücken aus laufen fünf Mittelfußknochen [*Ossa metatarsalia*] nach vorn auseinander und formen den Fußballen. Die Zehen [*Digitus pedis*] sind aus insgesamt 14 kleineren Knochen zusammengesetzt mit einer ähnlichen Verteilung wie bei den Fingerknochen. Das heißt, der große Zeh [*Hallux*] besteht aus nur 2 Zehenknochen, während die restlichen vier Zehen aus jeweils drei Knochen geformt sind.⁴³

⁴³ (Moll, et al., 2004 S. 11-210,259-287)

3.2 Funktionelle Anatomie der Gelenke

3.2.1 Allgemeine Bewegungsabläufe

Jede Bewegung erfolgt durch eine Annäherung bzw. Entfernung der entsprechenden Glieder, wobei der für die Ruhestellung typische Gelenkwinkel verkleinert, bzw. vergrößert wird. Im Allgemeinen beträgt dieser Winkel zwischen den Längsachsen der Gelenkpartner 180° und wird als Nullstellung bezeichnet. Bei der Beugung wird der Winkel verkleinert. Dieser wird als Beugewinkel bezeichnet. Bei einer Streckung erfolgt eine Vergrößerung des Gelenkwinkels, benannt als Streckwinkel. In den meisten Fällen ist der Beugewinkel größer als der Streckwinkel. In einigen Fällen ist auch das Gegenteil möglich (z.B. beim großen Zeh). Das Heranführen eines Körperteils an die senkrechte Körperachse bzw. das Wegführen davon, wird in dieser Arbeit als Hebung/Senkung oder Neigung (abhängig vom Körperteil) bezeichnet. Diese können seitlich, vorwärts oder rückwärts eintreten. Rotationsbewegungen finden in der Regel um die eigene longitudinale Achse eines Körperteils statt. Drehungen zur Körpermitte werden sinngemäß mit Innenrotation bezeichnet. Gegenteilige Rotationen heißen Außenrotationen. Des Weiteren treten in einigen Gelenken Translationsbewegungen auf. Bei diesem Vorgang bewegt sich ein Körper auf einer Geraden oder gekrümmten Linie ohne sich selbst zu drehen. Alle Punkte des Objekts legen dadurch die gleiche Strecke zurück. In einigen Fällen werden „aktive“ und „passive“ Bewegungsgrade genannt. „Aktiv“ bezieht sich auf den Bewegungsablauf, welcher aufgrund der eigenen Bänder und Muskeln des jeweiligen Körperteils durchgeführt werden kann. Passive Bewegungen sind daher nur mit Hilfestellung möglich. Bsp.: Überstreckung der Finger mit Hilfe der anderen Hand.⁴⁴

⁴⁴ (Hochschild, 2002)

3.2.2 Kriterien zur Klassifizierung der Gelenke

Gelenke [*Articulationes*] werden nach verschiedenen Prinzipien unterschieden. Unter anderem erfolgt eine Unterteilung aufgrund der Anzahl der gelenkbildenden Knochen. Somit ist das einfache Gelenk [*Articulatio simplex*] aus zwei sich gegenüberliegenden Knochen geformt. Das zusammengesetzte Gelenk [*Articulatio composita*] besteht hingegen aus mehr als zwei Knochen, umschlossen von einer Gelenkkapsel [*Capsula articularis*].⁴⁵

Des Weiteren erfolgt eine Untergliederung bezüglich der Form der Gelenkflächen und der daraus resultierenden Art der Bewegung. In den meisten Fällen lassen sich die Formen der Gelenkflächen mit einfachen geometrischen Körpern vergleichen. In der Regel besitzt eines der gelenkbildenden Knochen-Enden eine konkave Gelenkfläche, Gelenkvertiefung oder Gelenkpfanne, während das Gegenstück durch eine konvexe Fläche, Gelenkerhöhung, Gelenkkopf oder Gelenkwalze geformt wird. Sind beide Gelenkteile passgenau, so handelt es sich um ein kongruentes, ist gegenteiliges der Fall, um ein inkongruentes Gelenk.

Gelenke werden auch anhand der Anzahl der Bewegungsachsen in ein-, zwei- oder vielsachsig Gelenke unterteilt. Ebenso kann die gesamte Beweglichkeit als Kriterium dienen. Dabei erfolgt eine Klassifizierung in „unechte“ und „echte“ Gelenke. Die Form des „unechten“ Gelenks [*Synarthrose*] beschreibt eine kontinuierliche Verbindung der Knochen durch Füllgewebe. Es wird unterschieden in bandhafte [*Syndesmosen*], knorpelhafte [*Synchondrosen*] und knochenhafte [*Synostosen*] Gelenke. Diese besitzen eine geringe bis mittelgradige, in einigen Fällen auch gar keine Beweglichkeit. Hingegen sind „echte“ Gelenke [*Diarthrosen*] diskontinuierliche Verbindungen getrennt durch einen Gelenkspalt mit einer hohen Beweglichkeit abhängig vom Bandapparat.⁴⁶

⁴⁵ (R.Nickel, et al., 1992 S. 11-65)

⁴⁶ (R.Nickel, et al., 1992 S. 11-65)

3.2.3 Gelenktypen nach Gelenkflächenformen⁴⁷

Anhand der Gelenkflächenformen lassen sich die Gelenke in folgende Typen unterscheiden:

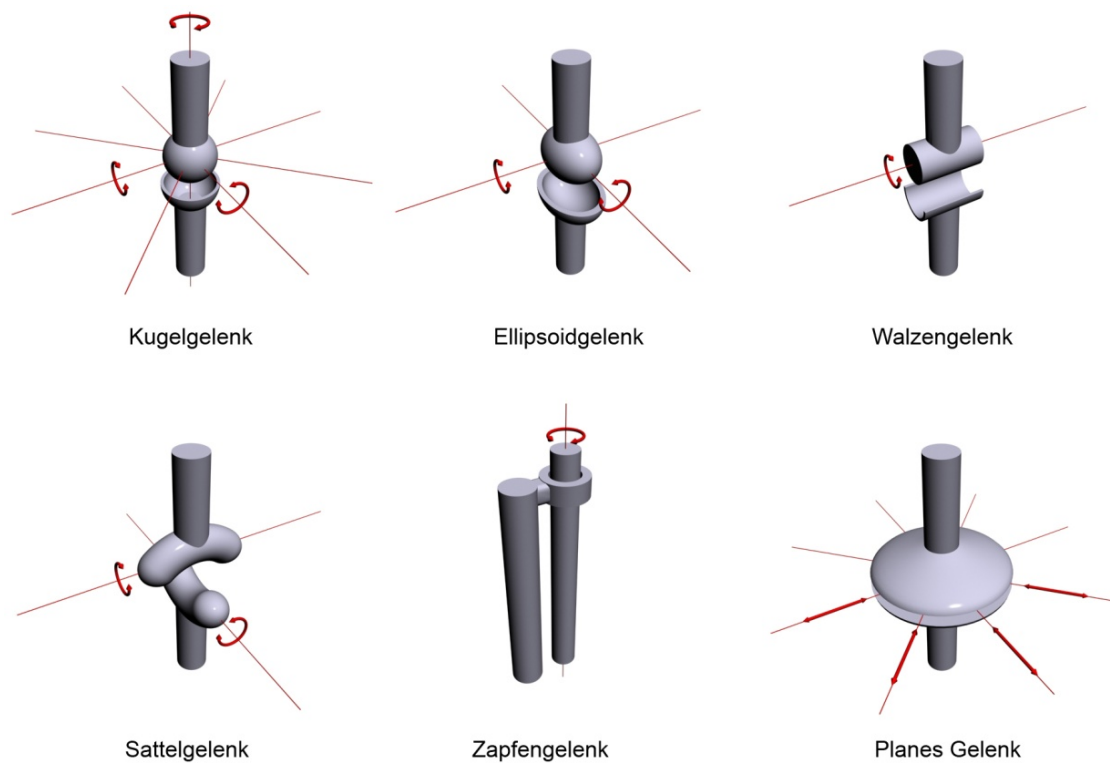


Abbildung 6: Gelenkformen

⁴⁷ (Hochschild, 2002)

Kugelgelenk [*Articulatio sphaeroidea*]

Dieser Gelenktyp besteht aus einer hohlkugelförmigen Gelenkpfanne. Diese ist größer als das gegenteilige kongruente Kugelsegment des Gelenkkopfes. Aufgrund der Bauweise ist es ein vielachsiges Gelenk, das in alle Richtungen frei beweglich ist. Neben Bewegungen um die zahlreichen Querachsen, lässt es auch Drehungen (Rotationsbewegungen) um die eigene Achse des Skelettstücks zu. Ein typisches Beispiel ist das Schultergelenk. Eine besondere Form des Kugelgelenks ist das so genannte Nussgelenk, in dem die Gelenkerhöhung über den Äquator des Kugelsegments hinausgeht. Dadurch wird per Anschlag die Bewegungsfreiheit eingeschränkt. Beispiel für diesen Typ ist das menschliche Hüftgelenk.

Ellipsoidgelenk (Eigelenk) [*Articulatio ellipsoidea*]

Aufgrund der ellipsenförmigen Gelenkflächen besitzt dieses Gelenk zwei zueinander senkrecht stehende Bewegungsachsen welche in Kombination miteinander eine Kreisbewegung ergeben. Als Beispiel hierfür ist das Handgelenk zu nennen.

Walzengelenk (Scharniergelenk) [*Articulatio condylaris*]

Die Pfanne der Gelenkvertiefung bildet die Hohlform eines Halbzylinders. Das kongruente Gegenstück wird durch eine quer liegende Walze definiert. Die Bewegung erfolgt nur um die eigene Achse der Walze, also nur auf einer Ebene die senkrecht zur Walzenachse steht. Dabei ist nur ein Wechsel zwischen Beugung und Streckung möglich wodurch dieses Gelenk auch Wechselgelenk genannt wird. Durch Führungsrinnen und den dazu kongruenten Führungskämmen wird der Zwanglauf des Gelenks wesentlich erhöht. Man spricht daher auch von einem Scharniergelenk. Das menschliche Ellenbogengelenk dient hierfür als Beispiel.

Sattelgelenk [*Articulatio sellaris*]

Die Gelenkerhöhung dieses zweiachsigen Gelenks ist ähnlich geformt wie die Sitzfläche eines Sattels. Die Gelenkpfanne ist dazu kongruent und passt sich genau der Gelenkerhöhung an. Hauptbewegungen des Sattelgelenks sind Beugung und Streckung um die Längsachse. Bewegungen um die Querachse werden meist durch Bänder erheblich eingeschränkt. Ein Beispiel ist das Daumengelenk.

Rad- oder Zapfengelenk [*Articulatio trochoidea*]

Ähnlich wie das Walzengelenk ist dieser Typ ebenfalls einachsig. Jedoch rotiert hier ein beweglicher Gelenkteil um die Achse eines zylindrischen, feststehenden Gelenkzapfens. Ein Rad- oder Zapfengelenk ist beim menschlichen Skelett zwischen dem ersten und zweiten Halswirbel zu finden.

Planes Gelenk [*Articulatio plana*]

Die ebenen Kontaktflächen zweier Knochen verschieben sich gleitend auf einer der Gelenkfläche gleichlaufenden Ebene. Somit sind nur Translationsbewegungen möglich, wie beispielsweise im kleinen Wirbelgelenk, der Verbindung der Wirbelfortsätze.

3.2.4 Beweglichkeit des menschlichen Skeletts⁴⁸

Die enorme Vielzahl an Gelenken unterschiedlichster Typen, ermöglicht eine große Bandbreite an Bewegungsabläufen. Trotz hoher Freiheitsgrade einiger Gelenktypen werden die Bewegungen durch Bänder und Muskeln extrem eingeschränkt. Auch wenn in dieser Arbeit der detaillierte Bewegungsapparat der Bänder und Muskeln keine Rolle spielt, müssen die Beschränkungen unbedingt berücksichtigt werden, da sonst der Forderung nach einer anatomisch korrekten Simulation eines Skeletts nicht Folge geleistet werden kann. Aus diesem Grund beziehen sich die im Folgenden beschriebenen Abläufe mit ihren Bewegungsgraden auf den gesamten Bewegungsapparat mit Gelenken, Bändern und Muskeln eines durchschnittlichen, lebenden Menschen. Die Beschreibung erfolgt unabhängig des Geschlechts.

Schädel und Halswirbelsäule (HWS)

Der Schädel mit Oberkiefer bildet eine relativ feste Einheit. Nur der Unterkiefer ist beweglich, da er durch echte Gelenke mit dem Schädel verbunden ist. Alle Bewegungen finden gleichzeitig in beiden Kiefergelenken (rechts und links) statt. Mundöffnung und Mundschließung erfolgen symmetrisch, während Kaubewegungen asymmetrisch ablaufen. Schädel, Unterkiefer und Schultergürtel bilden aufgrund straffer Bänder eine funktionelle Einheit. Wird beispielsweise der Unterkiefer bei einer Vorwärtsbewegung des Schädels zurückgehalten, entsteht dadurch ein Überbiss. Zusammen mit dem Kopfgelenk bilden die oberen Halswirbel (HW) (erster und zweiter Wirbel) ebenfalls eine funktionelle Einheit. Das gesamte Bewegungsausmaß beträgt ca. 30°, wobei die Beweglichkeit nach vorn etwas größer ist, als nach hinten. Eine seitliche Neigung des Kopfes zwischen Schädel und erstem HW ist mit etwa 3°-5° möglich. Das Ausmaß bei gleicher Bewegung zwischen erstem und zweitem HW ist hingegen kaum messbar. Die Rotation des Kopfes ist zwischen Schädel und erstem HW nur mit 5° pro Richtung möglich. Zwischen erstem und zweitem beträgt der Rotationswinkel 40° pro Richtung und macht somit fast die Hälfte der gesamten Rotation des Kopfes aus. In der unteren HWS unterscheiden sich die Ausmaße der Bewegungen von Wir-

⁴⁸ (Hochschild, 2002)

bel zu Wirbel. Die einzelnen Werte der oberen und unteren HW sind dem Diagramm in Abbildung 7 zu entnehmen. Die Beweglichkeit der gesamten HWS nach vorn ist maximal bis zum Kontakt zwischen Kinn und Brustbein möglich. Nach hinten endet die Bewegung, wenn die Nasen-Stirn-Linie etwa in einem Winkel von 30 Grad zur Horizontalen liegt. Die Seitenneigungen besitzen ein Bewegungsausmaß von ca. 40°-50° pro Richtung. Aufgrund der Gelenkflächen sind sie immer mit einer Begleitrotation in gleicher Richtung gekoppelt. Diese beträgt im Segment 2./3. HW ca. 5° und verringert sich zum siebten Wirbel hin. Das maximale Ausmaß der Rotation liegt bei insgesamt 80° pro Richtung. Bei nach vorn oder hinten geneigtem Kopf wird die Rotationsfreiheit eingeschränkt. Die einzelnen Freiheitsgrade unterliegen jedoch individuellen Eigenschaften.

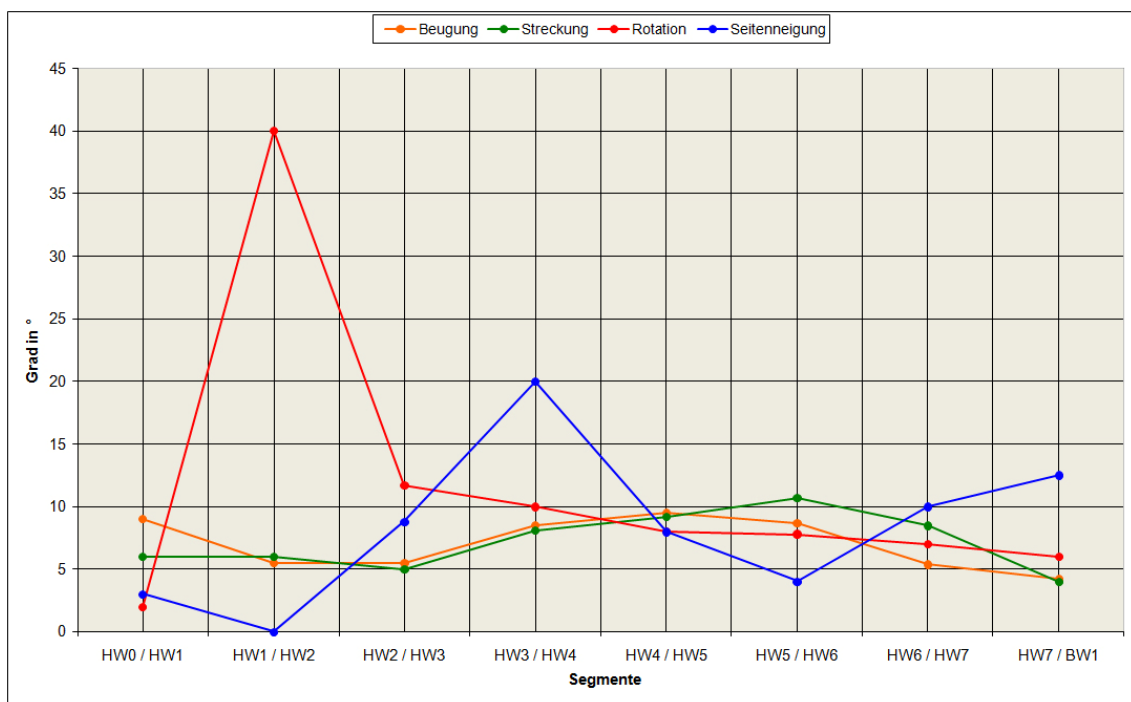


Abbildung 7: Diagramm Bewegungsgrade der HWS-Segmente

Brustwirbelsäule (BWS) und Oberkörper

Die Verbindungen der Brustwirbel (BW) mit dem Oberkörper [*Thorax*] schränkt die Beweglichkeit trotz elastischer Rippenknorpel ein. Der obere Teil der BWS (1.-8. BW) besitzt nur eine sehr geringe Beweglichkeit. Der untere Bereich (9.-12. BW) ist aufgrund hoher Knorpelanteile wesentlich beweglicher. Die genauen Freiheitsgrade für Vorwärts- und Rückwärtsbewegung, sowie Seitenneigung und Rotation der einzelnen Partien sind dem Diagramm in Abbildung 8 zu entnehmen. Das Heben und Senken der Rippen erfolgt um die eigene Knochenschaftachse der jeweiligen Rippe. Diese Achse verläuft durch die beiden Gelenke, durch welche eine Rippe mit einem Brustwirbel verbunden ist. Infolge dieser Bewegungen verändert sich der Durchmesser des Oberkörpers. Beim Heben (Einatmen) vergrößert er sich, beim Senken (Ausatmen) verringert sich der Durchmesser.

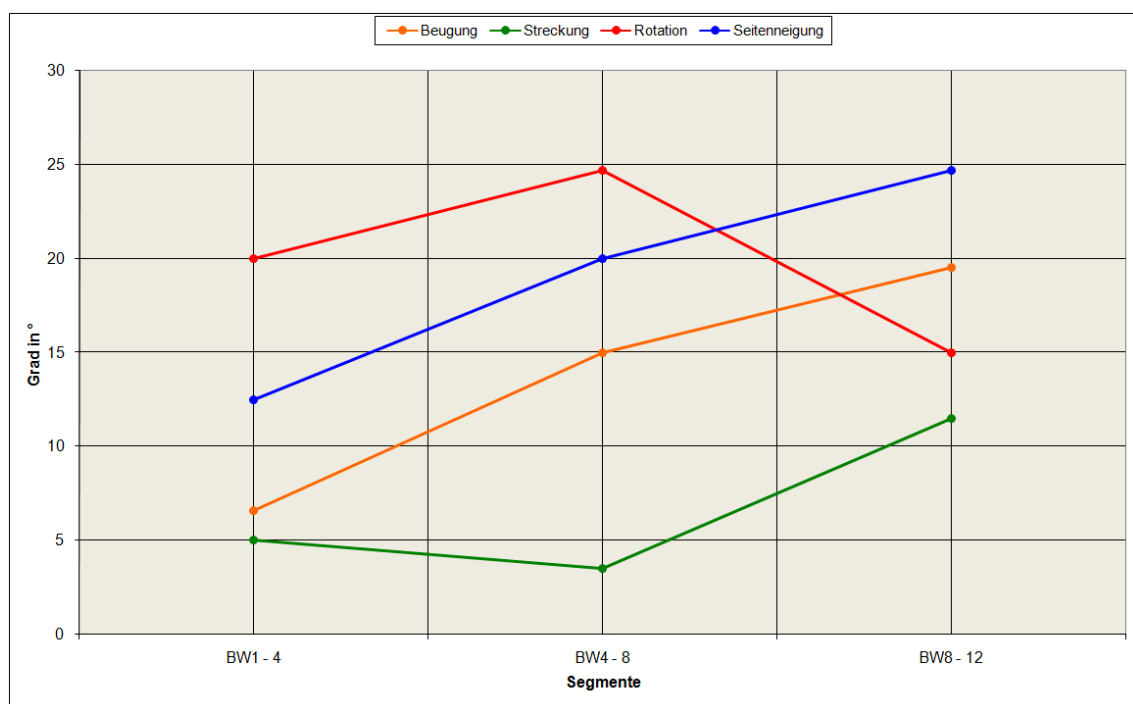


Abbildung 8: Diagramm Bewegungsgrade der BWS-Segmente

Lendenwirbelsäule (LWS)

Die Gesamtbeweglichkeit der LWS in Vorwärtsbewegung liegt bei 40°-45°. Im oberen und unteren Teil ist das Ausmaß dieser Bewegung etwas höher als im mittleren Bereich. In der Rückwärtsbewegung ist hingegen der untere Abschnitt wesentlich beweglicher als der obere. Die Beweglichkeit zur Seite ist im oberen Teil am höchsten. Im mittleren Bereich ist sie weniger gut ausgeprägt jedoch mit einer kleinen Verbesserung nach unten hin. Im letzten Segment findet so gut wie keine Seitwärtsbewegung mehr statt. Eine Rotation der Lendenwirbelsäule ist nur in Verbindung mit einer Seitwärtsbewegung möglich. Das Ausmaß der Rotation liegt bei etwa 3°-4° Gesamtrotation pro Segment. Bei nach hinten geneigtem Oberkörper ist nur eine geringfügige Rotation möglich. Ist der Körper nach vorn geneigt, ist hingegen mehr Rotation möglich. Sämtliche Werte für Beugung, Streckung, Rotation und Seitenneigung der einzelnen LWS-Segmente sind im Diagramm in Abbildung 9 grafisch dargestellt.

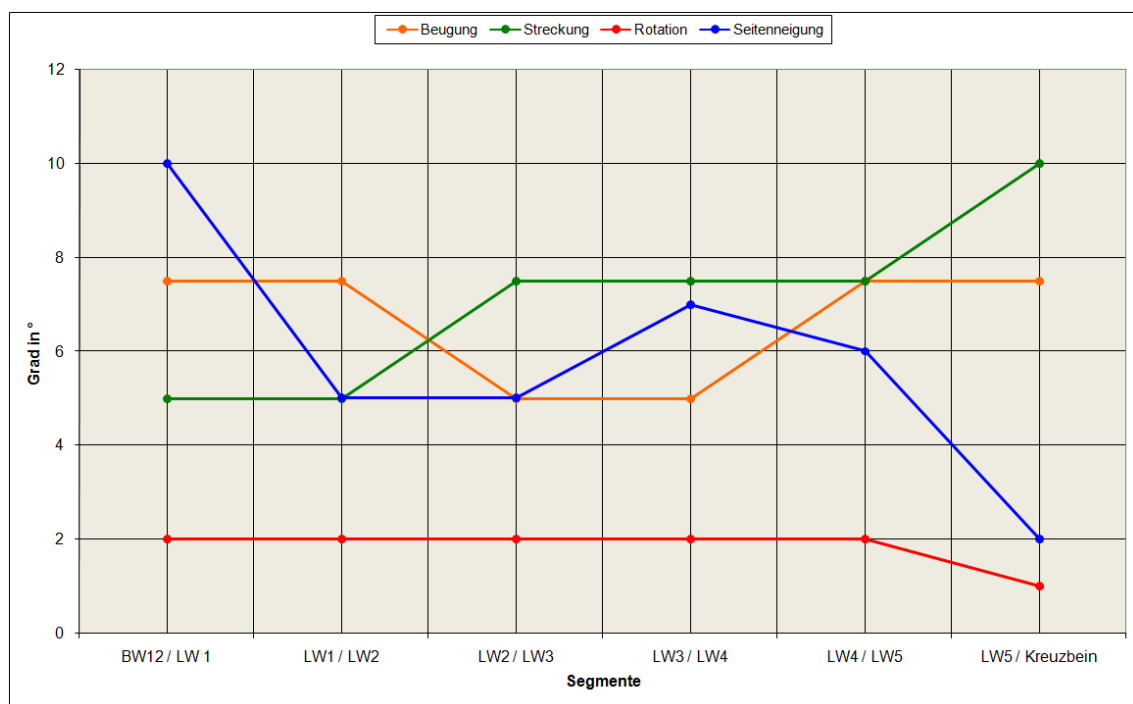


Abbildung 9: Diagramm Bewegungsgrade der LWS-Segmente

Schulter und Oberarm

Die enorme Beweglichkeit des menschlichen Armes ist begründet durch das Zusammenspiel mehrerer Gelenke. Rumpf und Arm stehen durch drei echte und zwei unechte Gelenke in Verbindung. Die wichtigsten sind: das Kugelgelenk zwischen Oberarm und Schulterblatt (Abb. 10/a), die große Gleitebene zwischen Schulterblatt und Rippen (Abb. 10/b), die Verbindung zwischen Schlüsselbein und Schulterblatt (Abb. 10/c) und das Gelenk zwischen Brustbein und Schlüsselbein (Abb. 10/d).

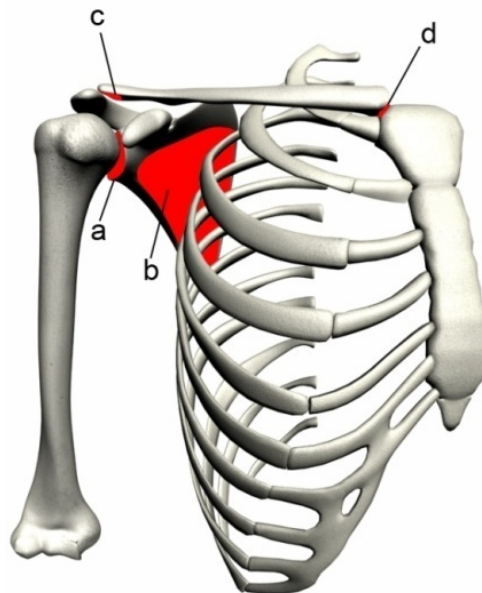


Abbildung 10: Gelenke der Schulter

Die Basis der Schulter ist das Schulterblatt [*Scapula*]. Im Gleitgelenk (Abb. 10/b) finden drei wesentliche Bewegungsarten statt: die Außenrotation (Abb. 11/1), das Heben und Senken (Abb. 11/2) sowie das Weg- und Heranführen von der bzw. zur Wirbelsäule (Abb. 11/3). Als wichtigste Bewegung ist die Außenrotation zu nennen, welche das Schwenken des Schulterblatts von der Wirbelsäule weg zum Schädel hin bezeichnet. Der Drehpunkt liegt ca. in der Mitte des Knochens und wandert während der Bewegung zum Steiß hin. Das gesam-

te Schwenkvermögen liegt bei ungefähr 60 Grad, wobei die untere Spitze des Blattes einen Weg etwa 10 cm zurücklegt. Das Heben der Schulter zum Schädel hin besitzt ein Ausmaß von etwa 10cm. Das Senken in Richtung des Steißbeines ist hingegen nur bis zu 3cm möglich. Die Bewegung des Heranführens zur Wirbelsäule, bzw. das Wegführen, sind durch das Schlüsselbein beschränkt. Dadurch unterliegt das Ausmaß stark den individuellen Eigenschaften.

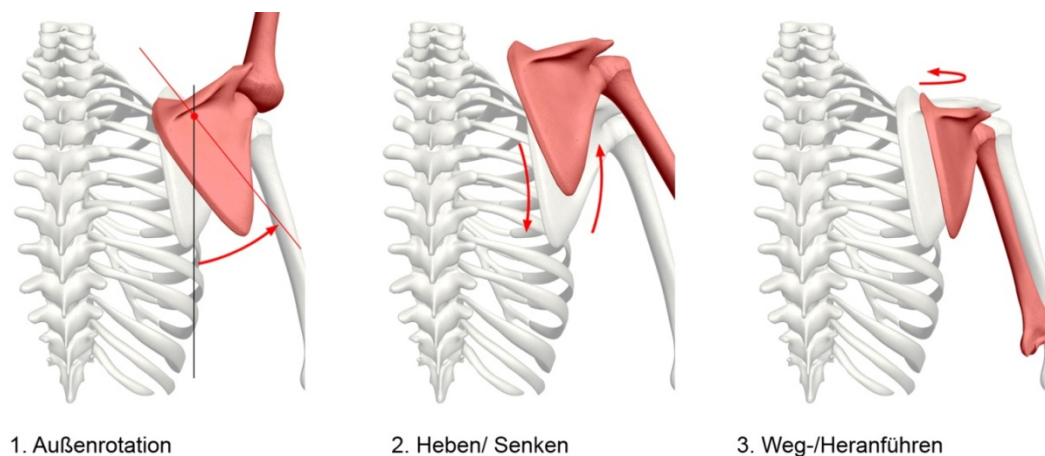


Abbildung 11: Bewegungen des Schulterblattes

Das Schlüsselbein ist durch das so genannte Schulterreckgelenk (Abb. 10/c) [*Articulatio acromioclavicularis*] mit dem Schulterblatt verbunden. Diese Verbindung wird durch Bänder und Muskeln so stark beschränkt, dass die Bewegungen (Rotation um die eigene Längsachse, Heben und Senken) nur sehr gering ausgeprägt sind. Am anderen Ende ist es durch das Schlüsselbeingelenk (Abb. 10/d) [*Articulatio sternoclavicularis*] mit dem Brustbein verbunden. Während dem Heben des Schulterblatts gleitet das Schlüsselbein, gekoppelt mit einer Rotation um die eigene Achse, in diesem Gelenk nach unten. Eingeschränkt wird die Bewegung durch die erste Rippe, welche direkt unterhalb verläuft. Beim Heben und Senken des gesamten Armes findet eine Bewegungskombination des Schlüsselbeines statt. Während sich das Schulterblatt nach außen dreht, hebt sich das schulternahe Ende um etwa 30 Grad schädelwärts. Um jedoch den gesamten Umfang der Bewegung zu ermöglichen, muss sich das Schlüsselbein aufgrund seiner S-Form um die eigene Achse nach außen drehen. Durch diese Drehung hebt es sich um weitere 30 Grad, so dass ein Maximum von 60 Grad erreicht wird. Diese Rotation erfolgt jedoch nicht erst bei Erreichen der 30 Grad sondern setzt we-

sentlich früher ein. Einsatzpunkt und Ausmaß der Rotation unterliegen individuellen Unterschieden. Das wahrscheinliche Mittelmaß der Rotation liegt bei unter 45 Grad.

Das seitliche Heben des Armes ist mit maximal 180 Grad möglich. Es erfolgt in 3 Phasen:

- Phase 1: Findet nur im Kugelgelenk der Schulter statt.
- Phase 2: Bei einem Winkel von 30-50° setzt eine Außenrotation des Schulterblattes ein (Abb. 11/1). Das Bewegungsverhältnis zwischen Arm und Schulter beträgt 2:1. (Bsp.: Bewegung des Armes=60° → Außenrotation der Schulter=30° → Gesamt=90°)
- Phase 3: Die letzten 20° werden durch die Bewegung der Wirbelsäule ermöglicht. Wird nur ein Arm angehoben, werden die Rippen angehoben und die Wirbelsäule neigt sich zur entgegen gesetzten Seite. Werden beide Arme angehoben, so streckt sich die Wirbelsäule mit den Rippen nach oben. Phase 3 setzt jedoch nicht erst bei 160° ein, sondern wesentlich früher. Der genaue Zeitpunkt ist aufgrund individueller Eigenschaften nicht genau bestimmbar.

Während dieser 3 Phasen findet zusätzlich eine unwillkürliche Außenrotation des Oberarmes statt (Codmans Paradoxon). Das Ausmaß liegt etwa zwischen 30-50°. Der Einsatzpunkt ist individuell abhängig und damit nicht genau erkennbar. Wird die Rotation des Armes bewusst kontrolliert, kann der Freiheitsgrad beeinflusst werden. In der Rotationsnullstellung ist eine seitliche Hebung von nur 80-90 Grad möglich. Durch maximale Außenrotation (95°) kann dieser Wert um 20-30 Grad erhöht werden. Erfolgt jedoch eine maximale Innenrotation (95°), so verringert sich das Ausmaß auf ca. 60 Grad. Die Bewegung des Oberarmes zur Körpermitte hin, kann einen Bewegungsgrad von 40-50 Grad erreichen. Aufgrund der Blockade durch den Oberkörper, wird dieser Vorgang erst möglich, wenn der Arm nach vorn oder hinten angehoben wird. Das Heben und Senken nach vorn, bzw. nach hinten, läuft ebenfalls in drei Phasen ab. Diese sind nicht genau differenzierbar, da sich die Schulter sofort mit bewegt. Nach vorn ist das Maximum bei 180° erreicht. Nach hinten sind nur 40-50° möglich.

Ellenbogen

Der Ellenbogen setzt sich aus zwei Gelenktypen zusammen: einem Scharniergelenk, das die Elle mit dem Oberarm verbindet, und einem Zapfengelenk als Verbindung zwischen Speiche und Elle. Die Hauptbewegungsachse des Unterarmes verläuft im Walzengelenk. In der Nullstellung bilden Ober- und Unterarm einen Winkel mit 180° . Die Beugung des Unterarmes beträgt im Maximum $130\text{-}150^\circ$. Aufgrund der Knochenform ist die Streckung mit nur 10° möglich. Eine der wichtigsten Bewegungen ist das Verdrehen von Elle und Speiche, wodurch die Beweglichkeit der Hand wesentlich erhöht wird. Die Verdrehung der gesamten Hand nach innen bzw. nach außen, besitzt ein Ausmaß von $80\text{-}90^\circ$. Bei maximaler Rotation nach innen legt sich die Speiche quer über die Elle. In gegenteiliger Stellung stehen Elle und Speiche parallel zueinander.

Hand

Trotz des Walzengelenks zwischen oberer und unterer Handwurzelreihe sind die Bewegungen durch Bänder sehr eingeschränkt. Aus diesem Grund, kann die Handwurzel in dieser Arbeit als eine starre Einheit gesehen werden. Handwurzel und Elle sind durch ein Eigelenk miteinander verbunden. Die Beugung der Handfläche zum Unterarm hin besitzt ein Ausmaß von ca. $60\text{-}80^\circ$. In entgegen gesetzter Richtung kann eine Streckung von ca. $40\text{-}60^\circ$ erreicht werden (vgl. Abb. 12). Bei der Bewegung zur Kleinfingerseite liegt der maximale Winkel bei ca. $30\text{-}40^\circ$. Zur Daumenseite sind etwa 20° möglich. Die Bestimmung der genauen Achsen ist aufgrund der komplexen Bewegungsabläufe schwierig. Die größte Annäherung der unterschiedlichen Achsen wird daher in der unteren Handwurzelreihe zwischen Kopfbein [*Capitatum*] und Mondbein [*Lunatum*] lokalisiert (vgl. Abb. 12).

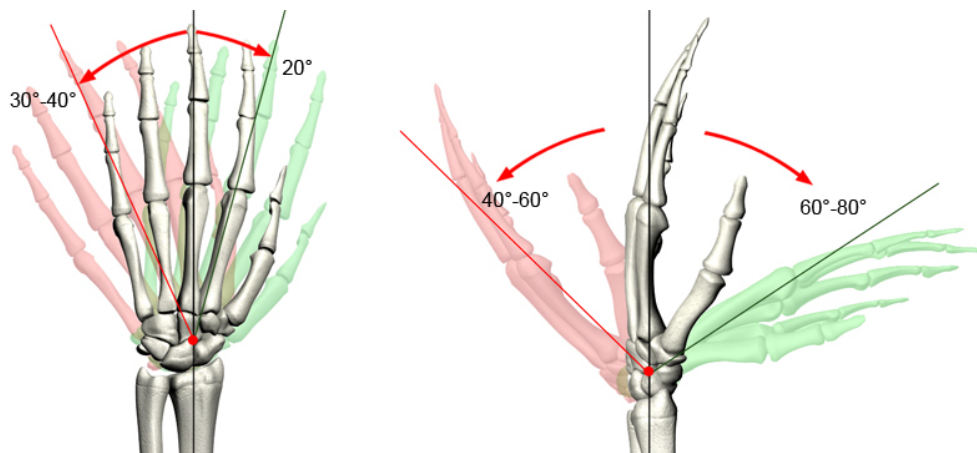


Abbildung 12: Bewegungen im Handgelenk

Die Verbindungen zwischen der Handwurzel und den Mittelhandknochen, werden auch als Wackelgelenke [*Amphiarthrosen*] bezeichnet. Wackelgelenke werden durch Bänder gestrafft und besitzen eine nicht nach Achsen geordnete geringe Beweglichkeit. Die Mittelhandknochen von Zeige- und Mittelfinger sind sehr straff mit der Handwurzel verbunden und sind nur sehr geringfügig bewegbar. Beim Ringfinger und dem kleinen Finger sind hingegen Beuge- und Streckbewegungen von ca. 15-30° möglich. Auch geringe seitliche und Drehbewegungen können durchgeführt werden. Eine Ausnahme ist der Mittelhandknochen des Daumens, da er über ein Sattelgelenk mit der Handwurzel verbunden ist. Dadurch sind Beugung und Streckung um die Längsachse mit 20° bzw. 45° möglich. Wie bereits beschrieben, werden die Bewegungen um die Querachse durch Bänder beschränkt. Im Sattelgelenk des Daumens ist daher nur eine seitliche Neigung von der Hand weg möglich. Das Ausmaß beträgt ca. 45°. Eine der wichtigsten Bewegungen ist die Gegenüberstellung des Daumens zu den Fingern (Berührung von Finger- und Daumenspitze). Bei diesem Vorgang erfolgt im Sattelgelenk eine Mischung aus Beugung und Seitenneigung, gekoppelt mit einer Innenrotation von 20-30°.

Das erste Fingergelenk ist die Verbindung zwischen Mittelhandknochen und erstem Fingerknochen [*Phalanx proximalis*]. Laut Klassifizierung nach Gelenkflächen ist es ein Kugelgelenk. Durch Bänder und Muskeln werden die Freiheiten des Kugelgelenks jedoch erheblich eingeschränkt. Aus der flachen Hand ergeben sich dadurch aktive Beugungen und Streckungen deren Werte in Tabelle 2 aufgeführt sind. Seitliche Neigungen der Finger liegen

im ersten Fingergelenk durchschnittlich bei 20-30°. Am beweglichsten ist der Mittelfinger. Axiale Rotationen sind nur passiv um ca. 10-20 Grad in jede Richtung möglich. Bei den weiteren einzelnen Fingergliedern handelt es sich um Walzengelenke. Aufgrund straffer Bänder sind auch hier die Bewegungen sehr eingeschränkt. Die einzelnen Freiheitsgrade sind ebenfalls der Tabelle 2 zu entnehmen. Die Fingerspitzen zeigen bei Beugung immer in Richtung der daumenseitigen Handwurzelknochen (oder des Daumenballens), was bei der Gegenüberstellung mit dem Daumen eine wichtige Rolle spielt. Erst dadurch werden die komplexen Greifbewegungen der menschlichen Hand möglich.



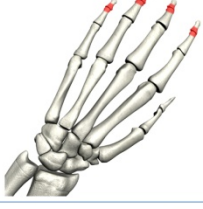
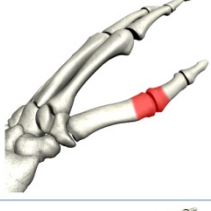
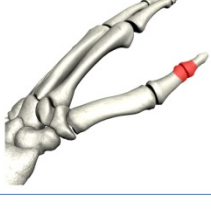
Gelenk	Abbildung	Beugung	Streckung
1. Fingergelenk (Kugelgelenk)		aktiv: 90°-100° passiv: 100°-110°	aktiv: 30° passiv: 80°-90°
2. Fingergelenk (Walzengelenk)		aktiv: 110° passiv: 115°	nicht möglich
3. Fingergelenk (Walzengelenk)		aktiv: 70°-80° passiv: 90°	aktiv: 5° passiv: 30°
Daumengelenk (Kugelgelenk)		aktiv: 40° passiv: 60°	nicht möglich
Daumenspitzen-gelenk (Walzengelenk)		aktiv: 80° passiv: 100°	aktiv: 10° passiv: 30°

Tabelle 2: Fingergelenke und ihre Freiheitsgrade

Becken und Hüftgelenke

Das menschliche Becken ist geformt aus dem Kreuzbein und den beiden Hüftbeinen. Aufgrund sehr geringer (passiver) Bewegungsausmaße von weniger als 2° kann es als starre, unbewegliche Einheit gesehen werden. Über das Kreuzbein ist es mit der Wirbelsäule verbunden. Der Freiheitsgrad dieses Segments wurde bereits in Abbildung 9 dargestellt. Das Kugelgelenk (Nussgelenk), welches den Oberschenkel mit dem Becken verbindet, besitzt drei wesentliche Bewegungsachsen (Abb. 13). Eine Besonderheit bildet die senkrechte Rotationsachse (Abb. 13/c), da sie nicht wie in Abbildung 6 (Gelenkformen) dargestellt der Knochenschaftachse entspricht. Die Bewegungen des Oberschenkels nach vorn und nach hinten (Beugung/Streckung) finden um die Achse Abb. 13/a statt. Das Ausmaß der Beugung liegt bei 130° - 140° . Dies ist jedoch nur mit angewinkeltem Knie möglich. Bei gestrecktem Knie ist allgemein nur ein Winkel von ca. 90° zu erwarten. Die maximale Streckung des Beines liegt bei 15° . Um die Achse Abb. 13/b erfolgt die seitliche Hebung und Senkung des Oberschenkels. Das Ausmaß der Hebung liegt bei 30° - 40° . Die Bewegung zur senkrechten Körperachse ist mit 20° - 30° möglich, insofern sie nicht durch das andere Bein behindert wird. Die Rotation wird um die Achse Abb. 13/c durchgeführt. Sichtbar wird diese Drehung erst mit angewinkeltem (gebeugten) Oberschenkel. Die Freiheitsgrade liegen bei 40° - 50° Innenrotation und 30° - 40° Außenrotation.

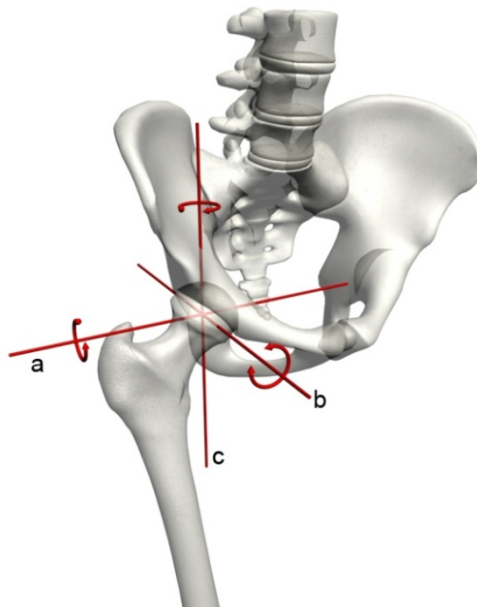


Abbildung 13: Bewegungsachsen im Hüftgelenk

Knie

Das Kniegelenk kann im entferntesten Sinn als Walzengelenk gesehen werden. Dennoch weicht es von der normalen Bauweise ab. Zum einen existiert zusätzlich eine senkrechte Rotationsachse (Abbildung 14/a). Zum anderen verlagert sich beim Beugen die Querachse (Abbildung 14/b), da sie immer dem momentanen Schnittpunkt der Kreuzbänder entspricht. Auch die Gelenkflächen sind nicht wie im Normalfall passgenau, sondern inkongruent.

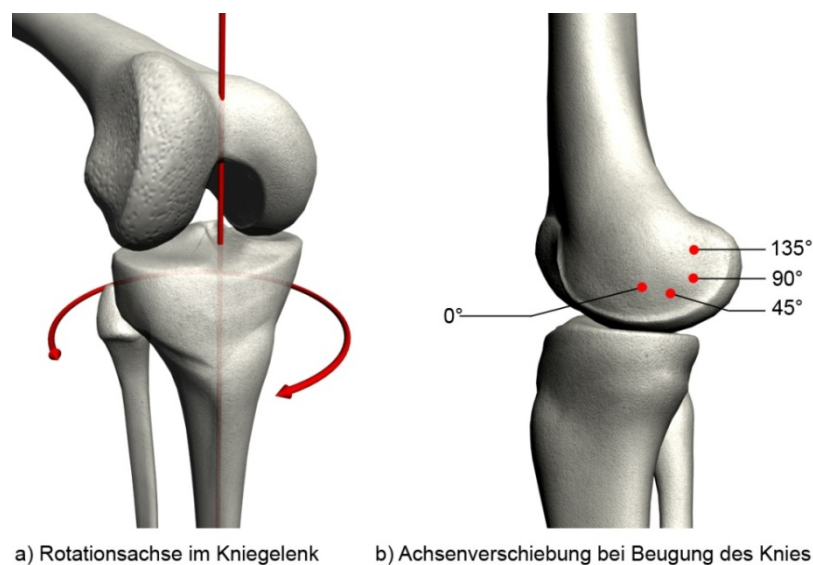


Abbildung 14: Rotationsachse und Achsenverschiebung im Kniegelenk

Durch Muskeln und Bänder ist die Beugung des Knies bei angewinkeltem Oberschenkel besser ausgeprägt, als bei gestrecktem. Ausgehend von der Nullstellung sind Aktiv maximal 140°, passiv 160° möglich. Die Streckung des Knies ist aktiv nur bis maximal 10° möglich, passiv können 15° erreicht werden. Am Ende der jeweiligen Bewegung ist zudem noch eine geringe Rotation des Knies erkennbar. Die Streckung bedingt eine Außenrotation (ca. 5°), während die Beugung eine Innenrotation (ca. 5°) des Unterschenkels bewirkt. Das bedeutet, dass die maximalen Bewegungsausmaße nur möglich sind, wenn auch die Rotationsfreiheit gewährleistet ist. Aufgrund der inkongruenten Gelenkflächen, werden Beugung und Streckung in einer Roll-Gleit-Bewegung gesteuert. Der Gelenkkopf des Oberschenkels besitzt eine wesentlich größere Kontaktfläche als die Gelenkpfanne des Schienbeins. Dadurch gleitet der Gelenkkopf während des Rollens um die Querachse nach vorn. Das Verhältnis

zwischen Rollen und Gleiten liegt am Beginn bei 2:1, was bedeutet, dass der Weg den der Gelenkkopf zurücklegen muss doppelt so lang ist, wie der der Gelenkpfanne. Am Ende der Bewegung erreicht das Verhältnis sogar einen Wert von 4:1. Die direkte Rotation ist nur mit gebeugtem Knie möglich. Das Ausmaß der Außenrotation beträgt aktiv ca. 45° (passiv 50°), während die Innenrotation das Maximum bei 30° (passiv 35°) erreicht. Rotationen im Kniegelenk sind wichtige Bewegungsabläufe, welche dem Erhalt des Gleichgewichts und der Anpassung an Bodenunebenheiten dienlich sind.

Eine Besonderheit des Kniegelenks ist die Kniescheibe [*Patella*]. Sie dient als Schutzschild des Kniegelenks und verhindert, dass die Sehne der Oberschenkel-Streckmuskulatur direkt auf dem Kniegelenk reibt. Bewegbar ist sie in sechs verschiedenen Freiheitsgraden. Diese sind in Abbildung 15 dargestellt.

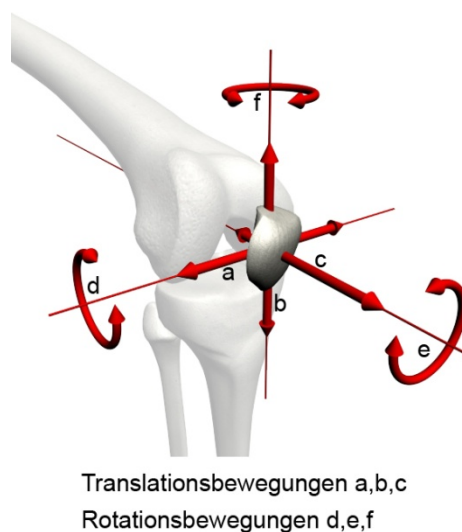


Abbildung 15: Bewegungsachsen der Kniescheibe

Durch Anspannung der Muskeln kann bei Nullstellung des Schienbeins die Scheibe um ca. 1-1,5 cm nach oben bewegt werden. Horizontal ist die Verschiebung nur passiv bis zu 1-2 cm möglich. Entlang der Achse Abb. 15/c sind bis zu 0,5 cm ausführbar. Die rotatorischen Bewegungen besitzen nur ein sehr geringes Ausmaß und treten als kombinierte Bewegungen auf. Während der Beugung des Schienbeines gleitet die Kniescheibe zwischen die beiden Rollkämme des Kniegelenks und legt einen Weg von ca. 8 cm zurück.

Fuß

Der menschliche Fuß ähnelt vom Aufbau her entfernt der Hand. Mehrere Gelenke ermöglichen sehr komplexe Bewegungsabläufe, die besonders für das aufrechte Gehen und das Halten des Gleichgewichts notwendig sind. Diese Gelenke sind das obere und untere Sprunggelenk sowie die Zehengelenke. Das obere Sprunggelenk (OSG) bildet die Verbindung zwischen Sprungbein (Teil der Fußwurzel) und dem Schienbein. Die Bewegungen erfolgen um eine Reihe von Momentachsen. Jedoch kann eine Kompromissachse definiert werden, die als Hauptbewegungsachse angenommen werden kann. Diese ist in Abbildung 16/a dargestellt und verläuft in einem Winkel von etwa 80° zur Senkrechten. Die Freiheitsgrade der Streckung und Beugung sind der Abbildung 16/b zu entnehmen. Ist der Fuß auf dem Boden fixiert, können diese Werte bei extremer Belastung um jeweils ca. 10° vergrößert werden (passive Bewegung). Die Ruhestellung bei entspannten Muskeln des Fußes liegt bei etwa 10° Streckung. In der Verbindung des Wadenbeines zum Schienbein [*Articulatio tibiofibularis*] kann keine Bewegungsachse festgelegt werden, da hier nur Gleitbewegungen stattfinden. Wegen Geringfügigkeit können diese vernachlässigt werden. Das untere Sprunggelenk (USG), welches Sprungbein und Fersenbein miteinander verbindet, besteht aus anatomischer Sicht aus zwei getrennten Gelenken, die eine funktionelle Einheit bilden. Aufgrund des komplexen Gelenkaufbaus, lassen sich drei sekundäre Achsen feststellen. Aus diesen Sekundären kann eine primäre Achse gebildet werden (siehe Abb. 16/c und 16/d). Wird der Fuß nach innen verdreht, liegt das Ausmaß der Bewegung um die primäre Achse bei $20-30^\circ$. In entgegen gesetzter Richtung sind nur $10-20^\circ$ Grad möglich.

Die Gelenke zwischen Fußwurzel und Mittelfuß werden als Tarsalgelenke (TSG) bezeichnet. Die TSG ermöglichen die Verdrehung des Vorderfußes, ebenfalls um eine Kompromissachse. Diese entspricht in etwa die Mittellinie des Fußes (siehe Abb. 16/e). Insgesamt besitzen sie Freiheitsgrade von $20-30^\circ$ Verdrehung nach außen und $30-40^\circ$ nach innen. Auch Beugung und Streckung sind ebenfalls, jedoch nur gering durchführbar. Das Ausmaß liegt bei ca. 10° pro Richtung. Der Verlauf der Bewegungsachse ist der Abbildung 16/f zu entnehmen. Die Freiheitsgrade der kleinen Verbindungen im Mittelfuß, einschließlich der Gelenke zwischen Mittelfußknochen und Fußwurzel, sind so gering, dass sie in dieser Arbeit vernachlässigt werden können.

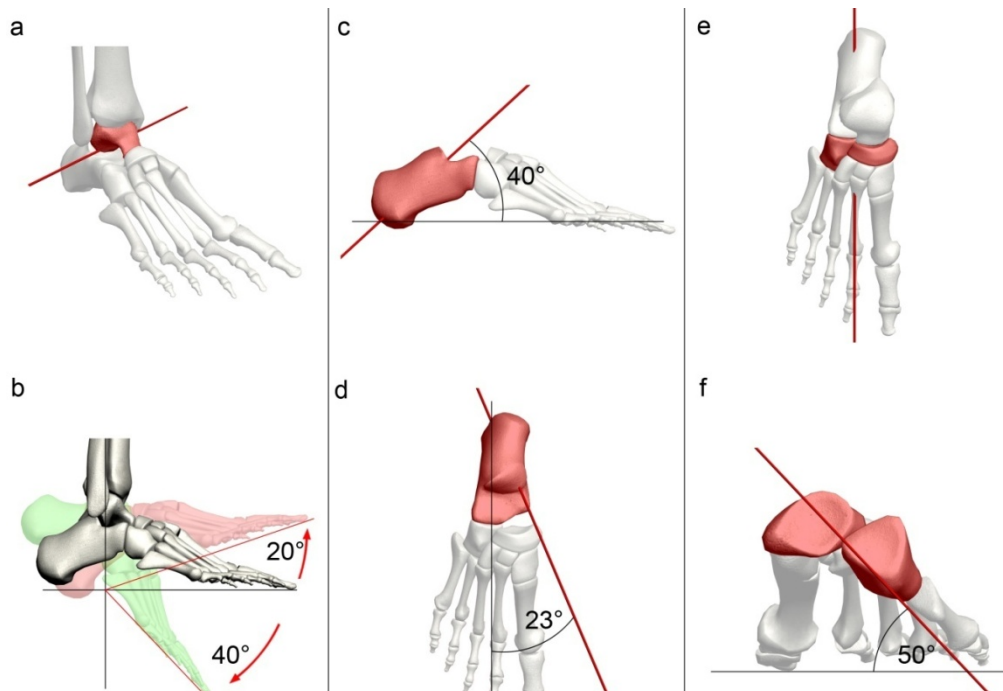


Abbildung 16: Bewegungsachsen des Fußes

Abbildung 16 :

- a) Kompromissachse OSG
- b) Freiheitsgrade OSG;
- c) Kompromissachse USG v. rechts
- d) Kompromissachse USG v. oben
- e) Rotationsachse TSG v. oben
- f) Beuge-/Streckachse TSG v. hinten

Die Verbindungen der Zehen ähneln stark denen der Finger. Sämtliche Bewegungsachsen entsprechen den gelenktypischen Spezifikationen. Die einzelnen Zehen mit Ausnahme der Großzehe bestehen jeweils aus 4 einzelnen Knochen. Die Großzehe besteht ähnlich wie der Daumen aus nur drei Knochen. Sämtliche Freiheitsgrade der Beugungen, Streckungen und seitwärtigen Bewegungen sind in der Tabelle 3 aufgeführt. Alle Werte unterliegen jedoch individuellen Unterschieden.



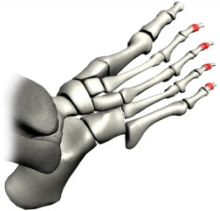
Gelenk	Abbildung	Beugung	Streckung	seitwärts
1. Zehengelenk (Kugelgelenk)		Zehen aktiv: 40° Großzehe aktiv: 45°	Zehen aktiv: 60° passiv: 70° Großzehe aktiv: 70° passiv: 80°	Zehen aktiv: geringgradig passiv: 10-20° Großzehe aktiv: 10° n. außen 5° n. innen passiv: jew. ca. +5°
2. Zehengelenk (Walzengelenk)		Zehen aktiv: 35° passiv: 40° Großzehe aktiv: 55° passiv: 60°	nicht möglich	nicht möglich
3. Zehengelenk (Walzengelenk)		aktiv: 50° passiv: 60°	aktiv: 5° passiv: 30°	nicht möglich

Tabelle 3: Freiheitsgrade der Zehengelenke

4 Rigging-Werkzeuge in 3ds Max9® und deren Eignung

In diesem Kapitel werden zwei verschiedene Methoden zur Implementierung einer Steuerstruktur analysiert. Beide sind Bestandteil der 3D- Software Autodesk® 3ds Max 9®. Als erstes wird die Methode der Benutzung einer vorgefertigten Struktur erläutert. In Autodesk® 3ds Max 9® wird diese als „Biped“ bezeichnet. Danach werden die Möglichkeiten einer manuellen Implementation einer Steuerstruktur untersucht. Dabei wird auf die wichtigsten Bestandteile einer möglichen Steuerstruktur eingegangen. Anschließend werden beide Systeme in Bezug zum praktischen Thema dieser Arbeit gesetzt und deren Eignung dafür bewertet. Am Schluss des Kapitels wird eine Entscheidung getroffen, welches der Systeme für das Rigging des Skeletts verwendet wird.

4.1 Vordefinierte Steuerstruktur (Biped)

4.1.1 Grundaufbau

Der Begriff Biped stammt aus dem Englischen und bedeutet übersetzt Zweifüßer oder Zweibeiner. Das Biped ist ein vollständiges, in 3dsMax 9® integriertes System. Es beinhaltet eine humanoide, zweibeinige Figur, die sofort nach der Erstellung animiert werden kann. Die einzelnen Bestandteile des Bipeds sind hierarchisch strukturiert. Es existiert ein Biped-Root-Objekt welches das höchste in der Hierarchie ist. Diesem direkt untergeordnet ist das Becken-Objekt des Bipeds. Die hierarchische Struktur des Bipeds entspricht der Struktur aus Kapitel 2.5. Innerhalb dieser Hierarchie sind verschiedene inverse kinematische Ketten eingerichtet, mit denen sich beispielsweise Arme, Beine oder Finger animieren lassen. Alle Objekte lassen sich durch Rotation um den jeweiligen Pivotpunkt auch mit Vorwärtskinematik bewegen. Die Freiheitsgrade sind in einigen Gelenken bereits eingerichtet, wie beispielsweise im Knie oder im Ellenbogengelenk. Sie werden jedoch nicht bei der Bewegung mit Vorwärtskinematik berücksichtigt, sondern gelten nur für die inverse Kinematik. Alle Gelenke des Bipeds sind standardisierte Kugelgelenke mit dem Pivotpunkt im Zentrum der Kugel des Gelenks.

Ein standardmäßig erstelltes Biped mit seiner gesamten Objekthierarchie ist in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 17: Objekthierarchie eines Bipeds

Das voreingestellte Biped besteht aus 30 Teilen:

- dem Wurzelobjekt (root)
- Kopf
- Hals
- Becken
- zwei Schlüsselbeinen
- zwei Ober und Unterarme
- zwei Hände mit jeweils einem dreigliedrigen Finger
- zwei Ober und Unterschenkel
- zwei Füßen mit jeweils einer dreigliedrigen Zehe
- sowie vier Wirbeln

Alle Teile sind bei der Erstellung des Biped benannt. Die einzelnen Objektnamen setzen sich wie folgt zusammen:

- Stammbezeichnung (voreingestellt: „Bip01“ abh. Von der Anzahl der Bipeds)
- Seitenbezeichnung „R“ für rechts und „L“ für links
- Körperteil, z.B. Kopf, Fuß, etc.
- einer fortlaufenden Nummerierung, falls das Körperteil aus mehreren Gliedern besteht

Der Grundaufbau kann der menschlichen Anatomie weiter angepasst werden, indem die Anzahl an Fingern, Wirbel und Zehen erhöht wird. Jedoch sind hierbei Grenzen gesetzt. Maximal können 25 Halsverbindungen, 10 Wirbel und 5 Finger bzw. Zehen mit jeweils 3 Gliedern eingestellt werden. Weiterhin können so genannte „Schwanzverbindungen“ und „Pferdeschwanzverbindungen“ mit jeweils maximal 25 Untergliederungen eingerichtet werden. Zusätzlich können 3 „skelettexterne“ Objekte hinzugefügt werden, so genannte Requisiten. Diese werden als längliche Quader implementiert und sind den Händen des Biped bereits untergeordnet, so dass sie deren Bewegungen folgen. Sie dienen der Interaktion des Charakters mit Gegenständen. Praktisch kann jedes Objekt dem System hinzugefügt werden, indem es einfach mit Teilen des Bipeds verknüpft und hierarchisch untergeordnet wird. Es muss jedoch separat animiert werden, und kann nicht mit den Biped- Animationshilfsmitteln manipuliert werden. Weitere Einstellung zum Grundaufbau können im Feld „Körpertyp“ vorgenommen werden. Es kann zwischen vier verschiedenen Modi gewählt werden:

- Skelett
- Männlich
- Weiblich
- Klassisch

„Skelett“ simuliert ein menschliches Skelett, welches sich „natürlich“ in Hautnetze einfügen soll.⁴⁹ „Männlich“ und „Weiblich“ hingegen sind nach männlichen, bzw. weiblichen Grundproportionen modellierte Bipeds. Der Modi „Klassisch“ ist ein Überbleibsel aus früheren Versionen von Charakter Studio⁵⁰.

4.1.2 Arbeitsschritte der Implementierung des Biped

Als erstes muss die Entscheidung getroffen werden, wie die Grundstruktur des Bipeds aussehen muss, um das Netzobjekt ausreichend animieren zu können. Diese Entscheidung sollte immer im Hinblick auf die Einfachheit einer Steuerstruktur getroffen werden. Beispielsweise ist es unnötig 5 dreigliedrige Zehen zu erstellen, wenn diese nicht einzeln animiert werden müssen, da die Figur „Schuhe“ an hat. Der Körpertyp des Bipeds ist abhängig von der Art der zu animierenden Figur. Werden menschliche Charaktere verwendet, so kann das männliche bzw. weibliche Biped verwendet werden. Für animalische oder abstrakte Gestalten ist es sinnvoller das klassische, bzw. das Skelett zu verwenden, da diese unabhängiger von Form und Geschlecht konfiguriert werden können. Der nächste Arbeitsschritt ist die Anpassung des Bipeds an das Netzobjekt. Alle Gelenke müssen mit denen des Charakters synchronisiert werden. Das bedeutet, dass das jeweilige Biped-Gelenk an die entsprechende Stelle des Netzobjektes verschoben werden muss. Dabei sollten die Proportionen der einzelnen Biped-Objekte an die Form der Figur angepasst werden, da dies von besonderer Bedeutung für das Skinning ist. Um einen virtuellen Charakter mit dem Biped zu animieren, muss eine Verbindung zwischen Charakter und Biped erstellt werden. Dies kann auf unterschiedliche Weise geschehen:

- mit Hilfe von Netzverformern (Skinning)
- direktes Verlinken (unterordnen) von Objekten mit dem Biped

Das ist abhängig vom Typ des Charakters. Gleicht der virtuelle Charakter einer aus Einzelteilen bestehenden roboterähnlichen Struktur mit sichtbaren Gelenkverbindungen, so

⁴⁹ (Autodesk)

⁵⁰ seit 3D Studio Max 4 integriertes Plug-In für Charakter- Rigging

können die Teile direkt über die Funktion „Auswählen und Verknüpfen“ mit dem jeweiligen Teil des Biped verbunden werden. Sie werden hierarchisch dem Biped-Skelettteil untergeordnet. Normalerweise bestehen Charaktere aber aus durchgängigen Polygonnetzen. Für diesen Fall gibt es verschiedene Modifikatoren wie beispielsweise „Haut“, „Physique“ oder „Verknüpfte X-Form“. Speziell die Variante „Physique“ wurde für die Verwendung zusammen mit Biped entwickelt. In dieser Arbeit wird jedoch nicht näher auf die Arbeitstechnik „Skinning“ eingegangen

4.1.3 Methoden der Biped-Animation

Zum animieren eines Biped stehen zwei grundlegende Methoden zur Verfügung. Zum einen die Schrittmethode, zum anderen die Freiformmethode. Beide können innerhalb einer Animation kombiniert und gemischt werden. Außerdem ist es mit Biped möglich „Motion Capture“ Daten zu laden. Auch hier können einzelne Schrittfolgen oder komplette Freiformanimation importiert werden.

Schrittmethode

Um Laufbewegungen zu animieren, können so genannte „Schritte“ eingerichtet werden. „Schritte“ sind im Biped-System ein zentrales Hilfsmittel zur Simulation von Schrittfolgen. Sie werden als Unterobjekte erzeugt, und sind nicht renderfähige Gizmos⁵¹. Nach der Einrichtung einer Schrittfolge, kann das Biped automatisch an dieser ausgerichtet werden, sodass in der aktuellen Zeitleiste Keyframeanimationen erzeugt werden. Dadurch können mit Hilfe der Schritthilfsmittel die komplexen zeitlichen und räumlichen Bezüge von Bewegungsabläufen beschrieben und umgesetzt werden.⁵² Besonders geeignet ist diese Methode für Figuren, die sich ständig auf einem „Boden“ befinden. Also für Animationen die das Gehen, Laufen, Rennen oder Springen einer Figur nachahmen sollen.

⁵¹ englisches Wort für ein kleines Hilfsmittel

⁵² (Autodesk)

Freiformmethode

Charakteranimationen, bei denen die Figur keine laufähnlichen Bewegungen macht, können mit der Freiformmethode animiert werden. Dabei wird jedes Körperteil des Bipedes mit Hilfe der herkömmlichen Transformationssteuerung (Translation/Rotation) bewegt. Durch die einzelne, manuelle Transformation von Biped-Objekten kann die gesamte Animation individueller gestaltet werden.

4.2 Manuell definierte Steuerstrukturen

3dsMax 9® bietet viele verschiedene Möglichkeiten eine eigene Steuerstruktur zu entwerfen. In dieser Arbeit werden nur die wesentlichsten erläutert, welche für den praktischen Teil des anatomiekonformen Riggings geeignet sind. Diese sind:

- das Bones System
- Helferobjekte
- inverse kinematische Ketten
- Beschränkungen und Controller

4.2.1 Das Bones-System

Das in 3dsMax 9® implementierte Bones-System (von engl. Bone = Knochen) ermöglicht die schnelle Erstellung kinematischer Ketten. Ein Bone-Objekt wird vom Pivotpunkt aus zur Bone-Spitze erstellt. Der Pivotpunkt ist der Gelenkdrehpunkt des übergeordneten Objekts. Die Bone-Spitze der Gelenkdrehpunkt dem ein weiterer Bone untergeordnet sein kann. Die Gelenke zwischen den Bones sind reine Rotationsgelenke. Das bedeutet, dass die Bone-Objekte innerhalb einer Kette so konfiguriert sind, dass der Pivotpunkt nicht translatorisch bewegt werden kann. Wie in Kapitel 2.6.2 beschrieben können Transformationen nur durch Rotation übergeordneter Bones erfolgen. Dieses System ist sehr vielseitig anwendbar, da für jedes beliebige Objekt Bones erstellt werden können, unabhängig von dessen Form. Besonders im Bereich der Figurenanimation bietet das System große Anwendungsmöglichkeiten. Da bei der Erstellung keine vorgegebenen Beschränkungen oder inverse kinematische Ketten existieren, kann es individuell angepasst und eingerichtet werden. Bones sind verzweigbar. Das bedeutet es kann eine hierarchische Baumstruktur erstellt werden bei der einem Objekt mehrere Bones-Ketten untergeordnet sind. Die Animation kann mittels direkter Kinematik oder inverser Kinematik durchgeführt werden. Für die Verwendung von inverser Kinematik stehen mehrere Berechnungsarten zur Verfügung, die im Kapitel 5.2.3 behandelt werden. Bones sind keine renderfähigen Objekte, können aber in den Objekteigenschaften dazu gemacht werden. Standardmäßig ist diese Option jedoch deaktiviert, da Bones hauptsächlich als Steuerstruktur verwendet werden. Um eine Bone-Kette für den Benutzer übersichtlich zu halten, bzw. um die Bones einer bestimmten Form anzupassen steht

eine Reihe an hilfreichen Einstellungsmöglichkeiten zur Verfügung. So kann zum Beispiel die Verjüngung oder die Größe festgelegt werden. Außerdem ist es möglich Bone-Markierungen, so genannte Flossen hinzuzufügen. Diese dienen zum einen dazu die Form des Bones der jeweiligen Objektkontur noch besser anzupassen, zum anderen kann dadurch die Ausrichtung des Bones deutlicher hervorgehoben werden. Die Eigenschaften von Bones können über das Rollout „Hilfsmittel zur Bone-Bearbeitung“ gesteuert werden. Damit ist es auch möglich, jedes beliebige Objekt als Bones zu definieren. Dadurch kann eine einfache hierarchische Kette von Objekten zu einer kinematischen Kette umgewandelt werden. Die durch das Bones-System erstellten Objekte sind im Allgemeinen jedoch besser zu verwenden da sie eine sehr geringe Polygonanzahl besitzen.

4.2.2 Helferobjekte

In 3dsMax 9® stehen dem Benutzer eine Reihe verschiedenster Helferobjekten zur Verfügung. Helfer sind nicht renderfähige Objekte, die zur Konstruktion, Animation, Beleuchtung, Manipulation, Messung etc. genutzt werden können. Die beiden wichtigsten und in der Praxis am meisten genutzten sind der „Dummy“ und der „Punkthelfer“.

Dummy

Der Dummy ist ein einfacher, nicht renderfähiger Drahtgitterwürfel ohne Unterteilungen der Flächen. Der Pivotpunkt liegt im geometrischen Zentrum des Würfels. Außer dem Namen, kann für den Dummy kein weiterer Parameter nach der Erstellung verändert werden. Nur über die herkömmliche Transformationssteuerung kann der Dummy im Nachhinein noch skaliert werden. Für den Dummy gelten die gleichen Eigenschaften in Bezug auf Verknüpfungen und Beschränkungen und Transformationen wie bei allen anderen Objekten.

Punkthelfer

Der Punkthelfer gleicht in seiner Funktionsweise stark dem Dummy. Er ist ebenfalls ein nicht renderfähiges Objekt, das im dreidimensionalen Raum als Bezugspunkt verwendet werden kann.

Der Punkthelfer ist eine weiter entwickelte Form des Dummys, da verschiedene Parameter verändert werden können. Diese sind:

- Anzeigen der Mittelpunktmarkierung
- Anzeigen der Achsenausrichtung
- Anzeigen eines Kreuzes als Verlängerung der Achsen
- Anzeigen eines Feldes in Form eines Drahtgitterwürfels
- Änderung der Größe
- Festlegung einer konstanten Bildschirmgröße unabhängig von Blickwinkel und Zoom

- Festlegung, dass Punkthelfer immer im Vordergrund angezeigt wird, und somit nicht von Geometrien verdeckt wird
- Darstellungsfarbe im Ansichtsfenster

Durch diese Anzahl an veränderbaren Parametern ist der Punkthelfer wesentlich flexibler als der Dummy und wird daher in der Praxis noch häufiger verwendet.

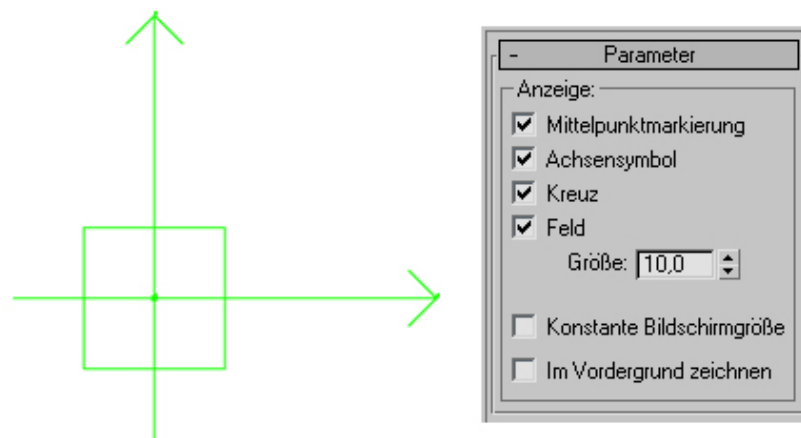


Abbildung 18: Punkthelfersymbol und Parameterpalette

Gruppierungen

Es gibt mehrere Möglichkeiten Objekte zusammenzufassen. Eine Möglichkeit ist die Anwendung der Gruppieren-Funktion über den gleichnamigen Menüpunkt. Damit können ausgewählte Objekte zu einer Gruppe zusammengefügt werden. Für diese Zusammenstellung wird ein gemeinsamer Drehpunkt berechnet, welcher wie bei allen Objekten über die Hierarchiepalette verändert werden kann. Somit kann auch die Gruppe als einzelnes Objekt verwendet werden. Wird ein Objekt zu einer bestehenden Gruppe hinzugefügt, erfolgt dadurch eine erneute Berechnung des Drehpunktes. Aufgrund der Notwendigkeit der genauen Positionierung des Drehpunktes, kann dieser Sachverhalt für diese Arbeit als Nachteil angesehen werden.

Eine weitere Variante um einzelne Objekte zu einem zusammenzufassen, besteht darin, bei einem ausgewählten Netzkörper in der Ändern-Palette die Elementauswahl zu aktivieren und über die Schaltfläche „Anhängen“ weitere Elemente zum Objekt hinzuzufügen. Bei diesem Vorgang erfolgt keine neue Drehpunktberechnung. Das bedeutet, dass durch das Hinzufügen von Elementen der Drehpunkt nicht verändert wird. Alle Objekte, die auf diese Art und Weise zusammengefügt werden, verlieren damit ihre Unabhängigkeit. Um einzelne Objekte wieder zu isolieren, kann man einzelne Elemente mit der „Loslösen-Funktion“ oder durch Kopieren und löschen der überzähligen Elemente auch wieder aus diesem Objekt entfernen. Besonders im späteren Verlauf, wenn Objektgruppen mit Steuerstrukturen verbunden sind, entsteht ein erheblicher Aufwand um einzelne Objekte zu isolieren und zu animieren.

Die dritte Option Gruppierungen zu bilden, erfolgt über die Verwendung von Helferobjekten und einer einfachen Unterordnung. Dazu wird ein Helfer erstellt, welcher ein Dummy oder Punkthelfer sein kann. Dieser Helfer repräsentiert den gemeinsamen Drehpunkt der Gruppierung. Alle Objekte, die gruppiert werden sollen, werden über die Funktion „Auswählen und Verknüpfen“ dem Helfer untergeordnet. Der Helfer ist somit die Wurzel der Hierarchie, der alle Objekte gleichwertig untergeordnet sind. Anhand dieser Variante wird die Unabhängigkeit der gruppierten Objekte gewährleistet, da die einzelnen Drehpunkte an ihren Positionen erhalten werden. Auch der Zugriff auf einzelne Teile der Gruppe ist problemlos möglich. In dem die Verknüpfung zwischen einem Objekt und dem Helfer getrennt wird, kann ein Teil isoliert werden ohne die Pivotpunkt-Eigenschaften der verbleibenden Gruppe zu beeinflussen. Somit ist auch das Hinzufügen von Objekten ohne großen Aufwand möglich.

4.2.3 Inverse Kinematische Ketten

Die Software 3dsMax 9® beinhaltet verschiedene Berechnungsmöglichkeiten der inversen Kinematik. Die wesentlichsten sind:

- Verlaufsunabhängige Berechnung
- Verlaufsabhängige Berechnung
- IK-Gliedberechnung
- Spline-IK-Berechnung

Sie können durch unterschiedliche Parameter definiert werden. Die Verwendbarkeit ist abhängig von der jeweiligen Art der Bewegung, bzw. Animation. Im Folgenden werden die IK-Möglichkeiten kurz erläutert.

Verlaufsunabhängige Berechnung (VU)

Diese Methode ist die in der Praxis am häufigsten verwendete Methode, wenn es um Charakter Rigging geht. Innerhalb einer Hierarchie können mehrere IK-Ketten unabhängig voneinander eingerichtet werden. Beispielsweise kann für ein Bein mit Fuß eine IK-Kette von Oberschenkel bis zum Fuß und eine vom Fuß bis zum großen Zeh definiert werden. Der Algorithmus der Berechnung ist verlaufsunabhängig. Das bedeutet, dass die Berechnung unabhängig davon erfolgt, wie stark oder in welche Richtung die IK-Kette bereits bewegt wurden. Daraus folgt, dass die Berechnung auch in langen Animationssequenzen gleich bleibend schnell erfolgt. Außerdem (laut Autodesk) soll sie aufgrund der effizienten Arbeitsweise stabil und flimmerfrei in den Ansichtsfenstern sein. Bei Erstellung einer verlaufsunabhängigen IK-Kette wird ein IK-Ziel erstellt. Wird das Ziel bewegt, bzw. animiert, so rotieren die Bones in ihren Gelenken automatisch. Die Berechnung der IK-Glieder erfolgt in nur einer Berechnungsebene. Das bedeutet, dass die Bewegung nur in eine axiale Richtung der einzelnen Drehgelenke möglich ist. Um den Winkel der Berechnungsebene zu ändern muss der DrehwinkelParameter beeinflusst werden. Der Drehwinkel kann animiert werden. Es ist auch möglich ein Objekt zu definieren das als Ausrichtungsziel für den Drehwinkel gilt.

Verlaufsabhängige Berechnung

Die Berechnung dieser inversen kinematischen Kette beruht auf den Bewegungen, die bereits mit der Kette durchgeführt wurden. Je mehr die Kettenglieder bewegt wurden, desto komplexer wird die Berechnung von weiteren Bewegungen. Aus diesem Grund, ist es sinnvoll, die verlaufsabhängige Kinematik nur bei kurzen Sequenzen mit wenigen Frames zu verwenden.

IK Gliedberechnung

Die IK-Gliedberechnung ist in ihrer Funktion und Berechnungsgrundlage identisch mit der verlaufsunabhängigen Inversen Kinematik. Der Unterschied liegt lediglich darin, dass mit dieser Methode eine Kette definiert werden kann, welche sich über nur ein Gelenk, das heißt 2 Bones erstreckt.

Spline⁵³-IK-Berechnung

Die Spline-IK dient dazu eine Bones-Kette anhand eines Pfades zu animieren. Die Kette wird an einen Pfad gebunden und verformt sich entsprechend dessen Eigenschaften. Bei der Einrichtung dieser Methode existieren zwei Möglichkeiten mit unterschiedlichen Eigenschaften. Eine Variante ist, zuerst den Bereich der IK-Kette zu wählen und im selben Zug den Spline. Das führt zu einer automatischen Einrichtung der inversen Kinematik. Die hierarchische Kette wird umgehend an den Spline verschoben und nach dessen Form verändert. Zum Pfad wird automatisch der Modifikator „Spline-IK-Steuerung“ hinzugefügt und für jeden Spline-Scheitelpunkt ein Dummy. Mit den Dummies kann die Form des Pfades verändert werden. Das Stammobjekt der IK-Kette wird ebenfalls automatisch mit einer Pfadbeschränkung an den Pfad geheftet. Dadurch kann eine Verschiebung der Kette entlang des Pfades ermöglicht werden. Die Bone-Kette kann nun mit Hilfe der Scheitelpunkt-Dummies des Pfades verformt werden oder über Prozentschrittweite der Pfadbeschränkung entlang des Pfades verschoben und animiert werden. Die zweite Variante ist eine manuelle Einrichtung. Zu erst wird dem Pfad der Modifikator „Spline-IK-Steuerung“ hinzugefügt. Im Bearbeitungsrollout können hier ebenfalls Helfer zur Steuerung der Scheitelpunkte angelegt wer-

⁵³ Spline = Pfad definiert durch mind. 2 Knotenpunkte

den. Im zweiten Schritt wird der Bereich der IK-Kette definiert. Die Kontur wird in dieser Variante nicht im selben Zug gewählt, sondern anschließend im Bearbeitungsrollout der Spline-IK über die entsprechende Schaltfläche eingerichtet. Durch diese Arbeitsweise nimmt die Hierarchiekette zwar die Form des Splines an, wird jedoch nicht an dessen Position verschoben. Der dritte Schritt wäre die Implementierung einer Pfadbeschränkung des Stamm-Objekts der IK-Kette. Dadurch wird die gesamte Struktur an den Pfad verschoben. Über die Prozentschrittweite kann nun wieder die Position der Kette entlang des Pfades verändert und animiert werden.

4.2.4 Verknüpfung von Parametern

In 3ds Max existieren sehr viele Modifikatoren und Hilfsmittel, die dazu verwendet werden können eine Steuerstruktur zu entwickeln. Dazu gehören auch die Methoden Parameter von Objekten mit Parametern anderer Objekte zu verknüpfen. Im Folgenden werden die wichtigsten Hilfsmittel dafür, kurz erläutert.

Parametervernetzung

Die Parametervernetzung dient dazu animierbare Parameter miteinander zu verbinden bzw. Parameter von Objekten mit benutzerdefinierten Attributen zu koppeln. Dies ist auf verschiedenste Weise möglich, da die Verknüpfung auf Ausdrücken der programminternen Scriptsprache „Maxscript“ basiert. Diese Ausdrücke können Scripte sein, oder einfache mathematische Formeln. Mithilfe eines Dialogfensters kann jeder animierbare Parameter mit einem anderen Verknüpft werden. Dabei ist die Verknüpfung vollkommen objektunabhängig. Es kann beispielsweise die x- Rotation einer Kugel mit der z-Translation eines Quaders gekoppelt werden.

Reaktionsmanager

Seit Version 7 von 3ds Max kann der Reaktionsmanager verwendet werden. Dieser ist ein Werkzeug, das es dem Benutzer ermöglicht, Abhängigkeiten zwischen animierbaren Parametern innerhalb einer Szene zu schaffen.⁵⁴ Diese Methode erfordert weder Scriptkenntnisse noch das erstellen von Mathematischen Formeln. Alle Abhängigkeiten werden hier in einer Master-Slave-Beziehung erstellt. Das bedeutet, dass Parameter eines Slave-Objektes abhängig von den Parametern des Masterobjektes sind. Der besondere Vorteil dieser Kopplung von Parametern ist die vereinfachte Einrichtung einer Verbindung. So müssen beispielsweise keine abstrakten mathematischen Formeln oder Scripte entwickelt werden um Zwei Parameter voneinander abhängig zu machen. Nachteilig hingegen kann es sich auswirken, dass der gekoppelte Parameter eines Slave-Objektes nicht mehr manuell verändert werden kann. Er kann nur noch durch den Parameter des Master-Objektes verändert werden. Alle Parameter werden über „Zustände“ miteinander verbunden. Es werden mindestens 2 Zustände benötigt um eine animierbare Kopplung von Parametern einzurichten.

Parametereditor und Attributbehälter

Mit Hilfe des Rollout „Parametereditor“ können eigene Parameter, so genannte „Benutzerdefinierte Attribute“ für Objekte, Modifikatoren und Animationsspuren definiert werden. Diese Parameter haben jedoch nur dann Auswirkungen, wenn sie mit anderen Parametern verbunden werden. Dies kann mittels Parametervernetzung oder dem Reaktionsmanager geschehen. Die erzeugten Attribute sind animierbar, werden in der Szenendatei mit gespeichert und können in der Spuransicht zusammen mit den Basisparametern angezeigt.

- Benutzerdefinierte Parameter können folgende Datentypen besitzen:
- Ganz- und Gleitkommazahlen
- Boolesche Werte
- Arrays
- Knoten
- Farben

⁵⁴ (Reaktionsschnell- der Reaction Manager, 2008)

- Textur-Maps
- Für jeden einzelnen Parameter kann außerdem definiert werden:
- die Bezeichnung,
- das Layout,
- der Wertebereich,
- der Vorgabewert
- der UI- Typ (Schieberegler, Zahlenauswahlfeld, Kontrollkästchen etc.)

Werden Parameter einem Objekt oder einem Modifikator hinzugefügt, so werden sie in der „Bearbeiten-Palette“ unter dem Punkt „Benutzerdefinierte Attribute“ angezeigt. Da bei einem editierbaren Polygonobjekt bereits sehr viele Rollouts mit Parametern in der „Bearbeiten-Palette“ existieren, kann die Einrichtung von neuen Parametern zur Unübersichtlichkeit führen. Abhilfe schafft der Modifikator „Attributenbehälter“. Das ist ein normaler Modifikator, der jedem Objekt zugewiesen werden kann. Er ist leer und beinhaltet keine Parameter. Dieser Modifikator ist speziell für die Erstellung von eigenen Parametern vorgesehen und kann nach Belieben mit Attributen gefüllt werden.

Parameterkollektor⁵⁵

Der Parameterkollektor ist ein Werkzeug in 3dsMax 9®, mit dem animierbare Parameter sortiert und so präsentiert werden können, dass sie mit nur wenigen Mausklicks beeinflussbar sind. Im Grunde kann er als frei belegbares Steuerpult gesehen werden. Ebenso kann er als Plattform für Operationen, welche auf ganze Gruppen von Parametern Einfluss haben verwendet werden. Somit dient der Parameterkollektor, der seit Version 7 von 3ds Max verfügbar ist, in erster Linie zur Vorbereitung von Animationen. Dabei werden folgende Ziele angestrebt:

- kompakte, gleichzeitige Veränderung von Parametern
- Übersichtlichkeit von animierten Parametern
- Schnelle Zugänglichkeit
- Unabhängigkeit von Objektauswahl und Arbeitsmodus

⁵⁵ (Parameter Collector: Sammelleidenschaft, 2008)

- Keine ungewünschte Veränderung von anderen Parametern

Es können einzelne Sammlungen von beliebig vielen Parametern erstellt und in einer Szene gespeichert werden. Auch die Übertragbarkeit in andere Szenen ist möglich. Die wichtigste und leistungsfähigste Funktion dieses Werkzeuges ist, dass alle Werte innerhalb einer Sammlung gleichzeitig, relativ oder absolut, veränderbar sind. Besteht beispielsweise eine Sammlung aus den x- Rotationen von vier einzelnen Objekten, so können mit Hilfe der Funktion „Mehrere Bearbeitungen“ alle vier Objekte gleichzeitig rotiert werden. Im Parameterkollektor können alle animierbaren Parameter eingebunden werden. Nicht animierbare Parameter können nicht mit diesem Werkzeug verwendet werden.

4.2.5 Beschränkungen von Bewegungen

Ein wichtiger Punkt bei der Erstellung manueller Steuerstrukturen ist das Beschränken von Bewegungen. Rotationen, Translationen sowie Skalierungen können in ihren Ausmaßen eingegrenzt werden. Die Grenzwerte werden als Freiheitsgrade bezeichnet. Im Allgemeinen dienen sie dazu die Steuerstruktur benutzerfreundlich zu gestalten und unerwünschte Bewegungen auszuschließen. Beschränkungen können auf verschiedene Arten eingerichtet werden. Im Folgenden werden die am häufigsten in der Praxis verwendeten kurz erläutert

Komplettes Sperren einzelner Achsen

Das komplette Sperren von Achsen bezüglich der translatorischen und rotatorischen Bewegungen kann direkt über die „Controller-Palette“ erfolgen. Dazu werden in diesem Panel die jeweiligen Achsen, die gesperrt werden sollen ausgewählt und ein Controller zugewiesen. Es stehen verschiedene Controller zum Sperren zur Verfügung. Der „Ein/Aus“ Controller ist speziell für das Sperren einzelner Achsen vorgesehen. Jedoch kann beispielsweise auch mit einem „Float-Script“ bzw. „Float-Ausdruck“ eine Achse gesperrt werden, indem der Momentanwert als Ausdruck bzw. Script angenommen wird. Für den Fall, dass alle Rotationen oder Translationen gesperrt werden sollen, besteht auch die Möglichkeit in der oberen Ebene des jeweiligen Controllers (Position/Rotation) einen „Float-Script“ bzw. „Float-Ausdruck“ für alle drei Achsen zu zuweisen. Der „Ein/Aus“ – Controller ist hier nicht verfügbar.

Einschränken der Bewegung einzelner Achsen

Das Einschränken von Bewegungen einzelner Achsen bezüglich der Translation und Rotation kann auf gleiche Weise erfolgen wie das komplette Sperren. Hierfür können ebenfalls die Controller „Float-Script“ bzw. „Float-Ausdruck“ verwendet werden wo durch Max-Script oder mathematische Formeln ein Grenzwert eingerichtet wird. Die schnellste Variante ist jedoch der „Float-Limit“ – Controller. Dieser ist für die einzelnen Achsen der Rotation und Translation verfügbar. Bei diesem werden ein Minimal- und ein Maximalwert definiert. Jedoch muss vorher ermittelt werden, in welchem Bereich sich der Momentanwert befindet. Das heißt, es muss geprüft werden welchen Wert die Rotation oder die Verschiebung des lokalen Koordinatensystems im Bezug zum Weltkoordinatensystem hat. Besonders bei der Beschränkung von Rotationen ist dies zwingend notwendig, da aufgrund falscher Werte unerwünschte Rotationen des Objektes entstehen können. Mit Hilfe dieses „Float-Limit“-Controllers kann ebenfalls eine Achse komplett gesperrt werden, indem Minimal- und Maximalwert dem Momentanwert entsprechen.

Vordefinierte Beschränkungs-Controller

In 3dsMax 9® gibt es eine Reihe an Beschränkungscontrollern, die es ermöglichen die Bewegungen eines Objektes in Verbindung mit einem anderen einzuschränken oder zu synchronisieren. Die wichtigsten sind die Pfadbeschränkung, die Positionsbeschränkung, die Ansehen-Beschränkung und die Ausrichtungsbeschränkung. Mit der Pfadbeschränkung wird ein Objekt an einen Pfad gebunden. Dabei wird es so verschoben, dass dessen Pivotpunkt direkt auf dem Pfad liegt. Verschiebungen mit der normalen Transformationssteuerung lassen sich nicht mehr durchführen. Die Position entlang des Pfades kann jedoch über einen Prozentwert festgelegt bzw. animiert werden. Rotationen sind weiterhin möglich und lassen sich durch das Folgen und Neigen in den Controller-Einstellungen zusätzlich dem Pfad anpassen.

Über die Positionsbeschränkung können die Translationen eines Objektes mit einem Anderen verknüpft werden. Dabei kann gewählt werden, ob die momentane Position beibehalten, oder ob das Objekt an den Pivotpunkt des Übergeordneten verschoben werden soll. Die Verschiebungen, die nun mit dem Zielobjekt der Beschränkung durchgeführt werden, übertragen sich automatisch auf das beschränkte Objekt. Rotationen werden nicht

übergeben. Im Gegensatz zur Verlinkung (Verknüpfungsbeschränkung) wird hier keine hierarchische Struktur geschaffen. Somit ist es möglich der Positionsbeschränkung mehrere Ziele zu zuweisen und die Gewichtung zwischen diesen Zielen zu manipulieren bzw. zu animieren. Ein Objekt kann also erst die Bewegungen eines Ziels A übernehmen, und dann in Abhängigkeit der Zeit langsam zur Übernahme der Bewegungen des Ziels B wechseln.

Die Ausrichtungsbeschränkung funktioniert ähnlich wie die Positionsbeschränkung, nur dass hier keine Translationen sondern nur Rotationen vom Zielobjekt zum beschränkten Objekt übertragen werden. Eine Animation der Gewichtungen zwischen beliebig vielen Zielen ist ebenfalls möglich.

Eine Mischform aus Ausrichtungsbeschränkung und Positionsbeschränkung ist die so genannte Ansehen-Beschränkung. Diese wirkt sich nur auf die Rotationen des beschränkten Objektes aus. Ausschlaggebend dafür sind jedoch die Translationsbewegungen des Ziels. Somit richtet sich die Rotation des Objektes nach der Position des Ziels aus. Es kann eingestellt werden, dass die momentane Ausrichtung beibehalten oder dem Ziel angepasst werden soll. Ebenso sind wieder die Gewichtungen zwischen mehreren Zielen animierbar.

Praktische Verwendbarkeit in dieser Arbeit

Das Biped biete dem Benutzer eine Reihe an Möglichkeiten. Es kann aufgrund der relativ simplen Handhabung sehr effizient eingesetzt und umgehend animiert werden. Besonders beim Rigging von einfachen virtuellen Charakteren ist die Verwendung eines Bipeds sinnvoll, da für diese Zwecke die Verwendung von standardisierten Kugelgelenken ausreichend ist. Dies liegt zum einen darin begründet, dass Steuerstrukturen so simpel wie möglich aufgebaut sein sollten. Zum anderen werden Steuerstrukturen über die verschiedenen Methoden des Skinings mit einem Netzkörper verbunden. Dadurch ist beim Netzkörper im Nachhinein nicht mehr sichtbar, ob es sich um Kugelgelenke oder um Gelenke mit realen Verhältnissen handelt. Die Simulation anatomiekonformer Gelenkbewegungen steht hier nicht im Vordergrund. Da diese Arbeit die Möglichkeiten eines anatomiekonformen Riggings untersucht sprechen folgende Kriterien gegen die Verwendung dieses Systems:

- im Biped existieren nur standardisierten Kugelgelenke > menschliche Gelenke können aber auch Walzen-, Sattel- oder Ellipsoidgelenke sein. Da diese andere Freiheitsgrade und auch zum Teil andere Bewegungsachsen besitzen, können sie für eine anatomisch exakte Nachbildung nicht durch Kugelgelenke ersetzt werden
- Bewegungen der menschlichen Gelenke sind zum Teil Mischbewegungen aus Rotation und Translation. Solche Mischbewegungen sind in einem Biped nicht möglich.
- komplizierte Bewegungen wie die des Unterarms und des Handgelenks (s. 0) können nicht mit einem Biped nachgebildet werden, da dort keine Elle und Speiche vorhanden sind
- die komplexen Bewegungen des Knies mit Kniescheibe (s. 0) sind mit einem vereinfachten Kugelgelenk nicht durchführbar
- die Wirbelsäule des Bipeds als inverse, kinematische Kette besitzt weniger Glieder als es Wirbel im menschlichen Körper gibt
- die bereits konfigurierten Beschränkungen des Bipeds stimmen nicht mit den anatomischen Vorgaben überein
- Bewegungen des menschlichen Schlüsselbeines, der Rippen und des Brustbeines sind beim Biped nicht möglich, da es dafür keine Objekte gibt

- Bewegungen eines Schulterblattes um die 3 Drehpunkte (s. 0) sind nicht möglich, da das Schultergelenk im Biped nur aus einem Kugelgelenk in der Nähe der Wirbelsäule besteht
- insgesamt sind die Möglichkeiten des Bipeds nicht individuell genug, um damit eine so komplexe Struktur wie die des menschlichen Skeletts detailgetreu und anatomisch richtig nachzubauen

Die Schlussfolgerung daraus ist, dass es notwendig ist eine eigene Steuerstruktur zu entwerfen, die den Ansprüchen der Anatomiekonformität entspricht. Dafür müssen die Methoden und Hilfsmittel zur Erstellung eines manuellen Riggings möglichst effizient eingesetzt und kombiniert werden. Für die Erstellung einer eigenen Steuerstruktur sprechen folgende Gründe:

- individuelle Anpassung an anatomische Vorgaben möglich
- spezielle Lösungen für komplexe Bewegungsvorgänge können in die Struktur eingebaut werden
- die Bewegung jedes einzelnen Knochens im Menschen kann in die Entwicklung der Steuerstruktur mit einfließen
- die funktionelle Anatomie der Gelenke kann viel detailgetreuer nachgebildet werden
- Freiheitsgrade können nach den Vorgaben aus Kapitel 4 exakt auf das Rigging übertragen werden

5 Rigging des Zygote Skelettmodells

5.1 Grundlegender Bauplan

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Verwendung eines Biped ausgeschlossen. Es wurde entschieden eine eigene Steuerstruktur zu erstellen. Dafür muss ein Grundbauplan erstellt werden, wie das Rigging aufgebaut sein muss.

Zu erst musste eine grundlegende Struktur geschaffen werden. Hierfür fiel die Entscheidung auf das Bones-System. Theoretisch kann jedes beliebige Objekt als Bone definiert werden. Somit wäre es möglich einfach jeden einzelnen Knochen des 3D- Skeletts einfach als Bone zu verwenden. Da jedoch die Geometrie der Knochenobjekte zu komplex, bzw. die Netzstruktur zu hoch aufgelöst ist, ist diese Vorgehensweise nicht sinnvoll. Der Forderung nach der Einfachheit einer Steuerstruktur kann mit derart komplexen geometrischen Objekten nicht nachgekommen werden. Aus diesem Grund wurde entschieden, dass ein Gerüst aus Standard-Bones erstellt werden muss. Soweit möglich, soll für jeden Knochen des Skeletts ein Bone erstellt werden. Nachdem die Struktur mit allen Beschränkungen fertig gestellt ist, werden sinnvolle Helferobjekte aus geometrischen Formen modelliert und so mit dem Bone-Gerüst verbunden, dass eine einfache Handhabung möglich ist. Des Weiteren muss eine Möglichkeit gefunden werden eine Vielzahl an Parametern für den Benutzer zusammen zu fassen, welche nicht sinnvoll über Helferobjekte verändert werden können. Die grundlegende hierarchische Struktur soll dem „Body-Tree“ aus Kapitel 2.5 entsprechen. Im Becken wird also als Wurzelobjekt eingerichtet. Insgesamt wird die hierarchische Struktur aufgrund der Vielzahl an Knochenobjekten wesentlich komplexer aussehen.

5.2 Direkte Modifikation des Skelettmodells

Die direkte Modifikation des Skelettmodells umfasst alle Veränderungen, die direkt am 3D- Skelettmodell vorgenommen wurden. Wie im Kapitel 1.3 beschrieben, besteht das vorhandene Skelettmodell aus einer kompletten, anatomisch korrekten Nachbildung des menschlichen Knochengerüsts. Zusätzlich enthält es Objekte, die nach medizinischer Sicht nicht in den Bereich der Knochen, sondern in den Bereich der Knorpel eingeordnet werden müs-

sen. Diese Objekte sind im Modell die Bandscheiben, die Verbindungen der Rippen mit dem Brustbein sowie eine Knorpelscheibe, die zwischen den beiden Beckenhälften liegt.

Im Punkt 3.2.4 beschreibt der Autor, dass bei Bewegung der Wirbelsäule eine elastische Verformung der Bandscheiben stattfindet. Diese Verformung ist beim echten Menschen ein wesentlicher Bestandteil der Wirbelsäulenbewegung. Für die Entwicklung einer Steuerstruktur ist sie jedoch irrelevant, da eine Steuerstruktur nur zur Bewegung der Wirbelknochen verwendet wird. Die Simulation der Bandscheibenverformungen ist animationstechnisch möglich. Jedoch ist der Aufwand zu hoch im Vergleich zum praktischen Nutzen. Deshalb wurden die Bandscheiben aus dem Modell komplett entfernt. Problematischer ist die Behandlung der Knorpelverbindungen zwischen den Rippen und dem Brustbein. Aufgrund der enormen Festigkeit dieser Knorpel wäre es sinnvoll diese Objekte als feste Knochen zu behandeln. Dagegen spricht jedoch die, wenn auch geringe, elastische Verformung die beim Aus- und Einatmen des Menschen zustande kommt. Zur Entscheidung über die Verwendung, bzw. Entfernung der Knorpel stehen mehrere Ansätze zur Verfügung. Zum einen stellt sich die Frage, inwiefern die Simulation von Atembewegungen sinnvoll oder nötig ist. Zum anderen sprechen ästhetische bzw. optische Gründe eindeutig gegen eine Entfernung, da dies den Eindruck einer unvollständigen Skelettstruktur erweckt. Da nach Beurteilung des Autors eine ästhetische und optische Vollständigkeit höher anzusiedeln ist, als die Simulation von nur schwach ausgeprägten Verformungen bei Atembewegungen, wurde entschieden die Knorpelverbindungen nicht zu entfernen. Vielmehr wurde eine Lösung zur Animation der elastischen Verformung der Knorpel gesucht. Die Knorpelscheibe, welche im Unteren Teil des Beckens die beiden Hüftbeine verbindet besitzt nur eine sehr geringe Elastizität. Auch finden in diesem Bereich kaum Bewegungen statt, sodass diese animationstechnisch vernachlässigt werden kann. Demnach wird die Scheibe als fester Knochen behandelt, und braucht nicht entfernt werden. Ferner wird sie sogar zu einer festen Gruppierung mit den Beckenknochen hinzugefügt.

Die nächste Modifikation betrifft die Anordnung der rechten und linken Rippen. Im Kapitel 3.2.4 beschreibt der Autor die Bewegung der einzelnen Rippen, die um nur eine Achse erfolgt. Diese Bewegung tritt nicht nur bei Atembewegungen des Menschen auf, sondern auch bei bestimmten Bewegungen der Wirbelsäule. Im vorliegenden Modell sind die zwölf Rippen auf der rechten und linken Seite zu einem Objekt zusammengefasst. In diesem Objekt bildet jede einzelne Rippe ein separates Element. Um jede Rippe einzeln animieren zu

können, muss die linke bzw. rechte Rippenhälfte so auf gespalten werden, dass jedes Element in ein eigenständiges Objekt mit Pivotpunkt konvertiert wird. Diese Aufspaltung erfolgte mit Hilfe der Funktion „Loslösen“. Das Element, welches in ein eigenständiges Objekt konvertiert werden sollte wurde in der Elementauswahl selektiert und durch „Loslösen“ extrahiert. Im Dialogfenster dieser Funktion konnte sofort ein neuer Name für das neu entstandene Objekt vergeben werden. Dis wurde für alle Rippen der rechten und linken Seite durchgeführt.

Eine weitere Aufspaltung eines Objektes wurde beim Oberschenkel vorgenommen. Im Kapitel 3.2.4 wurde erläutert, wie sich die Kniescheibe bei Bewegungen des Unterschenkels verhält, bzw. welche Freiheitsgrade die Kniescheibe bei Translationsbewegungen besitzt. Um einen möglichst hohen Realitätsgrad bei der Simulation zu erreichen, muss die deshalb Kniescheibe separat vom Oberschenkel bearbeitet werden. Das bedeutet auch, dass die Steuerstruktur des Beines so angepasst werden muss, dass eine realitätsnahe Simulation der Bewegungsabläufe im gesamten Kniegelenk durchführbar ist. Aus diesem Grund wurde die Kniescheibe in gleicher Vorgehensweise wie bei den Rippen vom Oberschenkel getrennt und als separates Objekt extrahiert. Dieser Vorgang wurde jeweils für die rechte und linke Seite durchgeführt.

5.3 Indirekte Modifikation des Skelettmodells

Die indirekte Modifikation des Skelettmodells umfasst alle Veränderungen die das 3D-Modell indirekt beeinflussen. Dazu zählt das Gruppieren von Knochen oder die Anpassung der Drehpunkte (DP) da diese Modifikationen mittels Helferobjekten vorgenommen wurden.

5.3.1 Festlegung der Drehpunkte der einzelnen Modellknochen

Im Kapitel 1.3 beschreibt der Autor den Aufbau des Skelettmodells der Firma Zygote. Dabei wurde auch auf die Ausrichtung der Drehpunkte der einzelnen Modellknochen eingegangen. Es wurde beschrieben, dass sich der Drehpunkt mit seinen lokalen Koordinatenachsen eines jeden Objekts im globalen Koordinatenursprung liegt. Unter Punkt 1.3 Funktionelle Anatomie der Gelenke wurden die Drehpunkte der einzelnen Knochen in den Gelenken festgelegt. Alle Knochenobjekte des Skelettmodells haben ihren Pivotpunkt im Ursprung des Welt-Koordinatensystems. Dies ist besonders von Vorteil wenn (versehentlich) im Raum verschobene Objekte wieder an ihre exakte Position im Skelett gebracht werden sollen. Um auch weiterhin diesen Vorteil nutzen zu können entschied der Autor die Drehpunkte der einzelnen Knochen nicht direkt zu ändern, sondern im globalen Koordinatenursprung zu belassen. Somit musste eine Möglichkeit gefunden werden die Gelenkdrehpunkte aus Kapitel 1.3 auf das Modell zu übertragen. Aus diesem Grund wurde eine Implementierung von Punkthelferobjekten vorgenommen. Die in dieser Arbeit verwendeten Punkthelfer entsprechen in ihren Anzeigoptionen der Abbildung 18 und wurden aufgrund ihrer Zuordnung zu einem bestimmten Modellteil sinngemäß mit einem Objektnamen bezeichnet. Beginnend mit der Wirbelsäule wurde für jeden einzelnen Wirbel ein Punkthelfer eingerichtet. Alle Helfer wurden in der Ansicht von Oben erstellt. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass die lokalen Achsen mit den globalen identisch waren, was die Weiterverarbeitung im Zusammenhang mit der Achsenausrichtung erleichterte. Vorerst wurde der Helfer in etwa im Zentrum eines jeden Wirbels grob ausgerichtet. Als Zentrum wurde nicht das Objektzentrum, sondern der Rückenmarkskanal gewählt. Um den Punkthelfer als Drehpunkt zu verwenden, mussten die lokalen Achsen so angepasst werden, dass sie mit den Bewegungsachsen, die in Kapitel 3.2.4 erörtert wurden, überein stimmen. Die Bewegungen der Beugung und Streckung in der Wirbelsäule verlaufen in der Realität um eine horizontale Achse des Wirbels. Diese entspricht der x- Achse im Modell. Rotationen sowie Seitenneigungen verlaufen dagegen um Achsen, die abhängig von den Wirbelflächen und der Wirbelstellung innerhalb der S-Form der Wirbelsäule liegen. Um die Punkthelfer diesen Gegebenheiten anzupassen, mussten sie um die x- Achse so verdreht werden, dass zum einen die z- Achse so ausgerichtet ist, dass Rotationen darum, laut den Diagrammen aus Kapitel 3.2.4 (Rotation um die Längsachse) durchführbar sind, ohne dass die Gelenkflächen des Modells ineinander laufen. Zum anderen musste darauf geachtet werden, dass die Y-Achse, um die die Seitenneigungen erfolgen, in einem vernünftigen Winkel zur Horizontalebene lag. Teil-

weise musste eine Kompromisslösung gefunden werden, da in der Realität die einzelnen Bewegungsachsen nicht zwangsläufig in einem Winkel von 90° zueinander stehen, so wie es im kartesischen Raum der Fall ist. Diese Anpassungen lagen deshalb im Ermessen des Autors unter Berücksichtigung des Polygonnetzes des 3D- Modells und der anatomischen Vorgaben. Die Bewegungen um die x- Achse, also die Beugung und Streckung sind in der Realität Bewegungen mit einem Gleitanteil. Das heißt, die Wirbel rotieren nicht einfach um einen Mittelpunkt, der im Rückenmarkskanal liegt, sondern bewegen sich in einer Dreh-Gleitbewegung nach vorn bzw. hinten, bei der die Bandscheiben verformt werden. Um dieses Dreh-Gleiten zu simulieren, musste der Drehpunkt verschoben werden, sodass er unterhalb und im hinteren Teil des jeweiligen Wirbels lag (vgl. Abb.19)

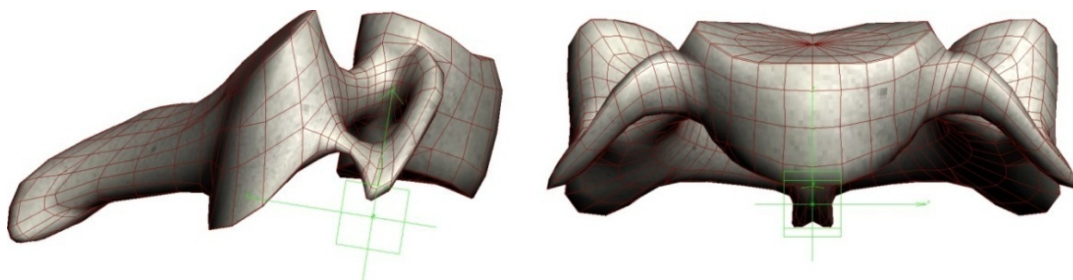


Abbildung 19: möglicher Drehpunkt eines Wirbels (links: von links, rechts: von vorn)

Die genaue Position des Drehpunktes lag dabei im Ermessen des Autors und wurde durch den Versuch die korrekten Bewegungen eines jeden Wirbels nachzuvollziehen festgelegt. Für diesen Versuch wurde das entsprechende Wirbelobjekt an den zugehörigen Punkthelfer über die Funktion „Auswählen und Verknüpfen“ gebunden. Damit konnte der Wirbel um die angepassten lokalen Achsen des Punkthelfers bewegt werden. Falls ein Punkt nach dem Versuch erneut positioniert werden musste, wurde die Verbindung getrennt, der Punkt verschoben bzw. gedreht und für einen erneuten Versuch die Verbindung wieder hergestellt.

Nachdem die Anpassung der Punkthelfer für die Halswirbelsäule abgeschlossen war, wurde durch die Position der Helfer die Übersichtlichkeit der Szene unzureichend für eine effiziente Weiterarbeit. Durch die Lagerung des Drehpunktes außerhalb des jeweiligen Objektes konnte keine Eindeutige Zuordnung von Helfer zu Wirbel erfolgen. Nur durch Aus-

wahl eines Objektes und Vergleich mit den Objektbezeichnungen der Punkthelfer konnte eine Zuordnung resultieren. Da dieser Mangel an Übersichtlichkeit im späteren Verlauf der Entwicklung der Steuerstrukturen zu erheblichen Problemen führen könnte, musste eine Lösung gefunden werden, welche zu einer besseren Übersicht führt, jedoch die Position der Drehpunkte unverändert ließ. Die Lösung dieses Problems ist eher unkonventionell, dafür aber effektiv und funktionsfähig. Im Allgemeinen wird ein Punkthelfer verwendet, um einen Drehpunkt für ein ihm untergeordnetes Objekt zu repräsentieren. Das bedeutet, dass erwartet wird, dass der Pivotpunkt in der Punkthelfermitte liegt. In der Hierarchiepalette von 3dsMax 9® kann jedoch der DP unabhängig vom Objekt verändert werden. Deshalb konnte Punkthelfer so ausgerichtet wurde, dass er in einer vernünftigen Position liegt, in der er bei einfachem Betrachten eindeutig einem Objekt zugeordnet werden kann. Der Pivotpunkt des Helfers wurde hingegen so ausgerichtet, wie es bereits erläutert wurde. Die Verschiebung des Pivotpunktes erwies zudem noch als Vorteil, da bei erneuter Positionierung die Verbindung zwischen Objekt und Helfer nicht getrennt werden musste. Auch wenn diese Vorgehensweise nicht den regulären Konventionen entspricht, konnte dadurch die Übersichtlichkeit bei der Weiterbearbeitung gewährleistet werden und ist nach Ansicht des Autors eine konforme Methode zur Verwendung von Helferobjekten. In den weiteren Arbeitsschritten wurden Punkthelfer für alle Objekte eingefügt, und mit Hinblick auf die Erhaltung der Übersichtlichkeit positioniert. Das heißt er wurde im geometrischen Zentrum eines Knochen-Objektes positioniert. Anschließend wurde jeweils der Pivotpunkt verschoben und gedreht, sodass er den realen Gelenkdrehpunkten entspricht. Die Definition aller Pivotpunkte unterlag zum einen den anatomischen Vorgaben, zum anderen den Vorgaben des Skelettmodells sowie dem Ermessen des Autors. Es wurde immer der Versuch der Durchführbarkeit des Bewegungsablaufes mit Beachtung von Freiheitsgraden und modelltechnischen Aspekten unternommen.

Eine spezielle Lösung war bei der Drehpunktanpassung des Schulterblattes erforderlich. Im Kapitel 3.2.4 beschreibt der Autor die drei Bewegungsarten des Hebens/Senkens, des Weg-/Heranführens und der Außenrotation. Alle drei Rotationen erfolgen um einen separaten Drehpunkt. Diese sind nicht miteinander vereinbar. Es konnte demnach kein gemeinsamer Pivotpunkt für einen Punkthelfer gefunden werden, um den die drei beschriebenen Bewegungen realistisch durchführbar waren. Die Lösung war, dass für das Objekt des Schulterblattes drei (für jede Bewegungsart einer), statt einem Punkthelfer eingerichtet werden musste. Die Punkthelfer wurden direkt im Objekt positioniert, während die Pivotpunkte nach dem bereits beschriebenen Versuchsverfahren bestimmt wurden.

Ein weiterer Sonderfall ist das Schlüsselbein. Dieses bildet die Verbindung zwischen Brustkorb (Brustbein) und der Schulter. Somit besitzt es zwei Gelenke, in denen sich bei Bewegung der Schulter, der Knochen gleichzeitig bewegt. Da im Gelenk zwischen Brustbein und Schlüsselbein wesentlich mehr Bewegung statt findet, wurde entschieden nur einen Punkthelfer zu verwenden, dessen Drehpunkt in genau diesem Gelenk liegt. Die Positionierung erfolgte dabei so, dass das Gleitverhalten des Schlüsselbeines zum Brustbein simuliert werden kann. Die Bewegung im Gelenk zum Schulterblatt wird durch Einrichtung einer inversen, kinematischen Kette gesteuert, was im späteren Verlauf der Arbeit detailliert erläutert wird.

Als Problemfall erwies sich auch das Kniegelenk. Gemeint ist damit die Verbindung zwischen Ober- und Unterschenkel. Die Kniescheibe spielt dabei vorerst keine Rolle. Im Kapitel 3.2.4 beschreibt der Autor den grundlegenden Bewegungsablauf in diesem Gelenk. Es wurde festgestellt, dass dieser Vorgang keine „reine“ Rotationsbewegung um eine Achse ist, sondern eine so genannte Roll-Gleitbewegung. Das bedeutet, zu Beginn der Bewegung findet eine Rotation um eine bestimmte Achse statt, die sich im weiteren Verlauf stark verschiebt. Das Verhältnis zwischen Rotation (Rollen) und Verschieben (Gleiten) ändert sich während der Bewegung. Zu Beginn ist ein Roll-Gleit-Verhältnis von ca. 1:2 messbar. Zum Ende hin beträgt es ca. 1:4. Um diesen komplexen Vorgang simulierbar zu machen, wurde folgende Lösung gefunden. Zuerst wurde ein Punkthelfer circa in der Mitte (gemessen an der Länge des Knochens) des Unterschenkels erstellt. Der Drehpunkt wurde so positioniert, dass erstens: er der Anfangsposition der Roll-Gleitbewegung entspricht, und zweitens: die Rotation der Rollkämme in diesem Punkt möglichst genau durchgeführt werden kann. Danach wurde eine einfache Kontur mit vier Scheitelpunkten über die Erstelle-Palette und der Option „Linie“ erzeugt. Die Grundlage für die Position der einzelnen Scheitelpunkte wurde den Achs-Positionen, welche in Abbildung 15 dargestellt sind, entnommen. Den Scheitelpunkten wurde die Variante „Bezier“ zugeteilt, um einen glatten, gleichmäßigen Spline zu erhalten. Der Pivotpunkt dieser Kontur wurde so ausgerichtet, dass er sich am Anfang der Kontur befindet, also an dem Punkt, der in Abbildung 15 als 0-Position dargestellt ist. Über das Ausrichten-Werkzeug wurde der gesamte Spline am Pivotpunkt des Unterschenkel-Punkthelfers ausgerichtet, sodass die Punkte identisch übereinander liegen. Um zu testen inwiefern der komplexe Bewegungsablauf des Kniegelenks mit Hilfe dieser Methode simulierbar ist, wurde der Unterschenkelknochen mit seinem Punkthelfer verknüpft und der Helfer wurde über eine Pfadbeschränkung an die Kontur gekoppelt. Diese Beschränkung wurde zu diesem Testzweck über den Menüpunkt „Animation“ eingerichtet. Im folgenden Verlauf

der Arbeit werden derartige Manipulationen direkt über das Rollout „Controller zuweisen“ in der Bewegungen-Palette eingerichtet. Bei der Verwendung von Pfadbeschränkungen erzeugt 3dsMax 9® standardmäßig zwei Keyframes. Einen im Frame Null, einen weiteren im letzten Frame der Zeitleiste. Da diese Keyframes weder in der Testphase, noch im späteren Verlauf der Arbeit nützlich sind, wurden sie entfernt, sodass die Steuerung des Pfades nur noch über den prozentualen Regler im Rollout Pfad-Parameter in der Bewegungen-Palette erfolgte. Durch Einstellung eines Prozentwertes für den Pfad und durch Rotation des Objektes um die zum Pfad rechtwinklige Achse konnte somit die Bewegung im Kniegelenk nachempfunden werden.

Dieser Versuch wurde zusätzlich noch zur Drehpunktbestimmung der Kniescheibe verwendet. Im Kapitel 3.2.4 beschreibt der Autor das Verhalten der Scheibe beim Anwinkeln des Unterschenkels. Nach diesen Gegebenheiten ist die Bewegung der Kniescheibe abhängig vom Winkel zwischen Ober- und Unterschenkel, sowie von der Position des Unterschenkels entlang des Pfades. Folglich wurde der Drehpunkt der Kniescheibe in Abhängigkeit der Knieposition festgelegt. Nach erfolgreichem Test des Kniegelenks und Einrichtung des Kniescheibendrehpunktes wurde die Pfadbeschränkung wieder aufgehoben, da im weiteren Verlauf die Punkthelfer nur als Schnittstelle zwischen Steuerstruktur und Modellkörper dienen sollten.

Das Sattelgelenk des Daumens erforderte eine weitere Kompromisslösung bei der Festlegung eines Drehpunktes. Dieses ist das Gelenk zwischen Handwurzelknochen und Daumen. Zuerst wurde wieder ein Punkthelfer im Mittelhandknochen des Daumens (als 1. Daumenknochen bezeichnet) eingerichtet, dessen Pivotpunkt im Sattelgelenk laut Kapitel 0 ausgerichtet wurde. Danach erfolgte ein Bewegungstest, dessen Vorgang bereits beschrieben wurde. Laut den Untersuchungen im Kapitel 0 besitzt das Sattelgelenk zwei Bewegungsachsen, die nicht zwangsläufig auf einer Ebene verlaufen müssen. Mit der Durchführung des Bewegungstests konnte festgestellt werden, dass die beiden Achsen auf so unterschiedlichen Ebenen verlaufen, dass die Einrichtung eines gemeinsamen Drehpunktes nicht möglich war. Also entschied sich der Autor für eine ähnliche Prozedur wie bei der Drehpunktfestlegung des Schulterblattes. So wurden zwei separate Punkthelfer eingefügt, einer für die Beuge und Streckbewegung, und einer für die Seitenneigung. Die Drehpunkte wurden wieder durch Tests ausgelotet und entsprechend ausgerichtet.

Das gleiche Problem der Positionierung eines gemeinsamen Drehpunktes zeigte sich beim Handgelenk, dem Gelenk zwischen Handwurzelknochen und Unterarm. In gleicher Vorgehensweise wie beim Daumensattelgelenk wurden auch hierfür zwei Punkthelfer mit ausgerichtetem Drehpunkt implementiert. Alle weiteren Drehpunkte konnten gemäß den Untersuchungen aus Kapitel 0 eingerichtet werden. Dennoch musste aufgrund der Polygonnetze des Skelettmodells jeder Drehpunkt einzeln durch Tests ausgelotet werden.

Im Kapitel 1.3 beschreibt der Autor, dass das vorhandene Skelettmodell symmetrisch zur globalen z- Ebene ist. Diese Symmetrie erwies sich als enormer Vorteil bei der Festlegung der Drehpunkte. Somit musste dieser Vorgang für jeden Knochen, welcher rechts und links existiert, nur einmal durchgeführt werden. Nach der Positionierung eines Punkthelfers auf der rechten Seite, wurde für die gegenüberliegende Seite ebenfalls ein Helfer eingefügt. Dazu wurde der bereits erstellte Punkthelfer durch Verschiebung entlang der globalen x- Achse kopiert und der inverse Wert für die globale x- Koordinate eingegeben um ihn auf die exakte gegenüberliegende Position zu verschieben. Anschließend wurde der Pivotpunkt für den Punkthelfer auf der rechten Seite festgelegt. Nach dessen erfolgreicher Positionierung wurde für die gegenüberliegende linke Seite ebenfalls der Pivotpunkt ausgerichtet. Die globalen Koordinaten der y- und z- Position der rechten Seite wurden kopiert und für den Punkt der linken Seite eingefügt. Für die x- Position wurde stets der inverse Wert verwendet. In den meisten Fällen wurde der Pivotpunkt rotiert. Somit mussten auch die Winkel auf den gegenüberliegenden Punkt übertragen werden. Abhängig von der Drehrichtung konnten die Werte kopiert oder invertiert werden.

5.3.2 Zusammenfassung von Modellknochen (Gruppierung)

Fast jeder Knochen im menschlichen Skelett kann auf irgendeine Art und Weise bewegt werden. Unterschieden wird dabei in aktive und passive Bewegung. Einige Knochen besitzen ein so geringes Ausmaß der Bewegung, dass für eine komplexe Simulation die Nachahmung solcher geringer Rotationen oder Verschiebungen an Relevanz verliert. Technisch ist diese Simulation grundsätzlich möglich, jedoch steht hier der Aufwand im Vergleich zum Nutzen in einem sehr ungünstigen Verhältnis. Aufgrund dessen wurde geprüft welche Knochen des Skelettmodells zusammengefasst werden können um sie bei der Entwicklung der Steuerstruktur als ein starres Objekt behandeln zu können. Nach sorgfältiger Abwägung der

Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren aus Kapitel 4.2.2 entschied sich der Autor für die Verwendung der dritten Option, die die Gruppierung mit einem Punkthelfer beschreibt. Für den weiteren Verlauf der Arbeit bietet diese Möglichkeit nach Ansicht des Autors die sinnvollste Lösung im Zusammenhang mit der Weiterverarbeitbarkeit einzelner gruppierter Objekte. Außerdem gleicht diese Variante der in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Festlegung der Drehpunkte. Nur mit dem Unterschied, dass in diesem Fall mehrere Objekte dem Punkthelfer untergeordnet werden.

Die Beschreibung der Gruppierungen erfolgt von oben nach unten, also vom Schädel zum Fuß hin. Die Vorgabe für den Schädel war unter Anderem eine Animierbarkeit des Unterkiefers. Aus diesem Grund konnte der gesamte Schädel nicht zu einer einzigen Gruppe zusammengefügt werden. Der Schädel gliedert sich in mehrere unabhängige Objekte. Diese sind der obere Schädelknochen, der Unterkieferknochen, das Zungenbein, eine untere und eine obere Zahnreihe. Der obere Schädelknochen wurde wie im Kapitel 5.3.1 beschrieben einem Punkthelfer untergeordnet. Die restlichen Teile wurden zu einer Gruppe zusammengefasst. Der Punkthelfer für diese Gruppe wurde sinngemäß im Zentrum des Oberkieferknochens platziert. Danach erfolgte die Unterordnung der Knochenteile. Anschließend wurde der Pivotpunkt wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben positioniert. Besonders in diesen Fällen erwies sich die Methode der Trennung von Punkthelfer und Drehpunkt als enormer Vorteil, da zur Ausrichtung des Drehpunktes die Verbindungen zwischen Helfer und Objekten nicht entfernt werden musste, was bei der Durchführung dieser Arbeitsschritte eine große Zeitersparnis bedeutete.

Eine weitere Zusammenfassung von einzelnen Objekten wurde in der Handwurzel vorgenommen. Im Punkt 0 wurde die Handwurzel aufgrund ihrer geringen Bewegungsausmaße bereits als starre Einheit für diese Arbeit klassifiziert. Demnach wurden alle der Handwurzel zugehörigen Knochen gruppiert. In Kapitel 3.2.4 beschreibt der Autor die Sonderbehandlung der Handwurzel bei der Vergabe des Drehpunktes. Es müssen somit zwei Punkthelfer existieren, die die unterschiedlichen Bewegungen repräsentieren können. Deshalb musste entschieden werden, welchem Helfer die Handwurzelknochen untergeordnet werden müssen. Da die spätere Struktur vom Handgelenk zu den Fingerspitzen verläuft, musste die Zuordnung zum hierarchisch niedrigeren Helfer erfolgen. Da die Beuge- und Streckbewegung vom Autor aufgrund des Bewegungsumfanges als höherwertig eingestuft wurde, ist somit

die Seitenrotation hierarchisch untergeordnet. Die Gruppierung der Handwurzelknochen erfolgte demnach anhand des Punkthelfers für die Seitenrotation des Handgelenks.

Das gesamte menschliche Becken samt Kreuzbein, Hüftbeinen und Knorpelscheibe wurde schon unter Punkt 3.2.4 aufgrund geringer Bewegungsausmaße als feste Einheit klassifiziert. Die einzelnen genannten Objekte wurden unter einem Punkthelfer gruppiert. Da im Becken der Schwerpunkt des Menschen liegt, wurde der Helfer im augenscheinlichen Mittelpunkt platziert. Für dessen Pivotpunkt erfolgte somit keine separate Positionierung.

Aufgrund der geringfügigen Gleitbewegungen zwischen dem Schienbein und dem Wadenbein kann auch hier eine Gruppierung erfolgen. Schienbein und Wadenbein wurden beide dem Punkthelfer für den Unterschenkel untergeordnet.

Eine letzte Gruppierung wurde im Fuß vorgenommen. Die geringen Bewegungen innerhalb der Tarsalgelenke sowie der Mittelfußknochen können vernachlässigt werden. Es wurde deshalb ein Punkthelfer eingefügt, dessen Pivotpunkt im Gelenk zwischen Tarsalknochen und dem Sprungbein positioniert wurde. Alle Tarsal- und Mittelfußknochen wurden diesem Helfer untergeordnet.

5.4 Entwicklung der Steuerstruktur

Die Beschreibung der Vorgehensweise bei der Erstellung der Steuerstruktur erfolgt in Abschnitten. Diese behandeln jeweils die Wirbelsäule, den Brustkorb, die Schulter, den Arm, das Knie- und das Fußgelenk.

5.4.1 Die Wirbelsäule

In einem ersten Versuch die Wirbelsäule mit einem Bones-System zu versehen wurde folgendermaßen vorgegangen:

Zuerst wurde das gesamte Skelettmodell ausgeblendet, da die hohe Anzahl an Polygonen die Rechenleistung stark auslastet. Ebenso wurden, aus Gründen der Übersichtlichkeit, sämtliche Punkthelfer ausgeblendet, die nicht Bestandteil der Wirbelsäule oder des Kopfes sind. Anschließend wurden die Bones in der Ansicht von links erstellt, da in dieser Perspektive die S-Form der Wirbelsäule, welche durch die Punkthelfer repräsentiert wird, am besten sichtbar war. An dieser Stelle zeigte sich, dass die Methode der Trennung von Drehpunkt und Punkthelferobjekt sinnvoll ist, da die Übersichtlichkeit das Arbeiten erheblich erleichterte. Im Folgenden wurde für das Objektfangwerkzeug von 3dsMax 9® die Option „Drehpunkt“ aktiviert. Diese bewirkt, dass bei „Berührung“ des Mauszeigers mit einem Objekt dessen Umrandung durch dessen Pivotpunkt als hellblaue Markierung angezeigt wird. Wird mit aktiviertem Objektfang nun ein Objekt erstellt, wird es automatisch im Pivotpunkt des „berührten“ Objekts erzeugt. Mithilfe dieser Funktion wurde die gesamte Bone-Struktur erzeugt. Dazu musste der Bone-Erstellungsmodus aktiviert werden. Mit aktiviertem Objektfang wurde der Mauszeiger als erstes über den Punkthelfer des Beckens bewegt. Durch einfachen Klick wurde ein Bone-Objekt im festgelegten Pivotpunkt erzeugt. Mit dem Bewegen auf den letzten Lendenwirbel und erneutem einfachen Klick wurde dieser erste Bone mit seiner Spitze, welche gleichzeitig Drehpunkt des nächsten Bones ist, im festgelegten Drehpunkt des letzten Lendenwirbels fertig gestellt. In gleicher Vorgehensweise, wurde anschließend von Wirbel zu Wirbel ein Bone erzeugt. Das in der Hierarchie oberste Objekt ist der Becken-Bone, das Unterste ist der Bone für den Schädel. Für den Unterkiefer wurde ein separater Bone eingefügt, der dem Schädel-Bone mit Hilfe der „Auswählen und Ver-

knüpfen“-Funktion untergeordnet wurde. Die fertige Bone-Struktur der Wirbelsäule für diesen Versuch ist in Abbildung 20 dargestellt.

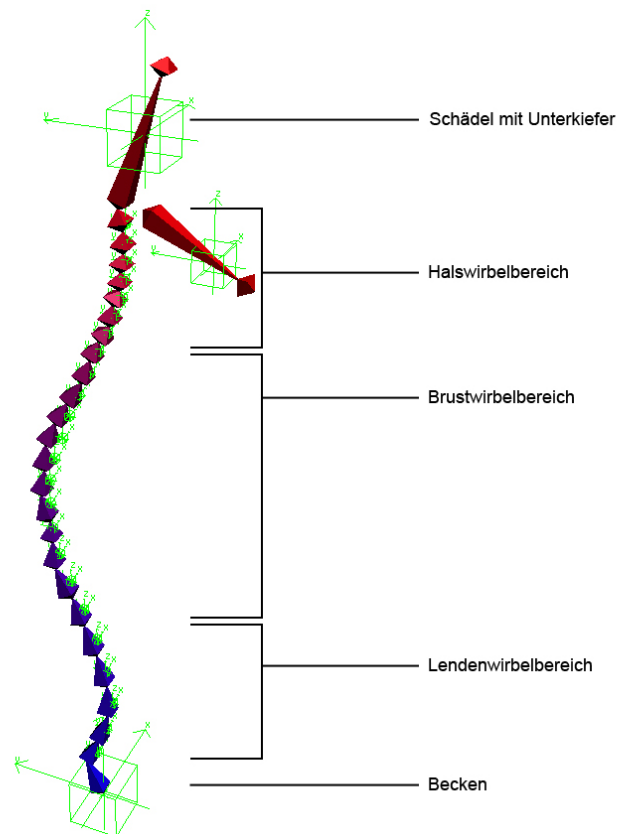


Abbildung 20: Bones-Kette der Wirbelsäule

Bei diesem ersten Versuch wurde jedoch eine Eigenart der Bones sichtbar, durch die die Bone-Struktur grundlegend geändert werden musste. Diese Eigenart bezieht sich auf die Ausrichtung der Bones. Da die Erstellung der Bones immer von einem Punkthelfer zum nächsten erfolgte, zeigte die Bone-Spitze immer auf den nächstfolgenden Pivotpunkt. Dadurch war zwar der Pivotpunkt des nächsten Bones an der richtigen Position. Jedoch war die Ausrichtung nicht identisch mit der bereits ermittelten des Punktes. Zum besseren Verständnis ist dieser Sachverhalt in Abbildung 21 dargestellt.

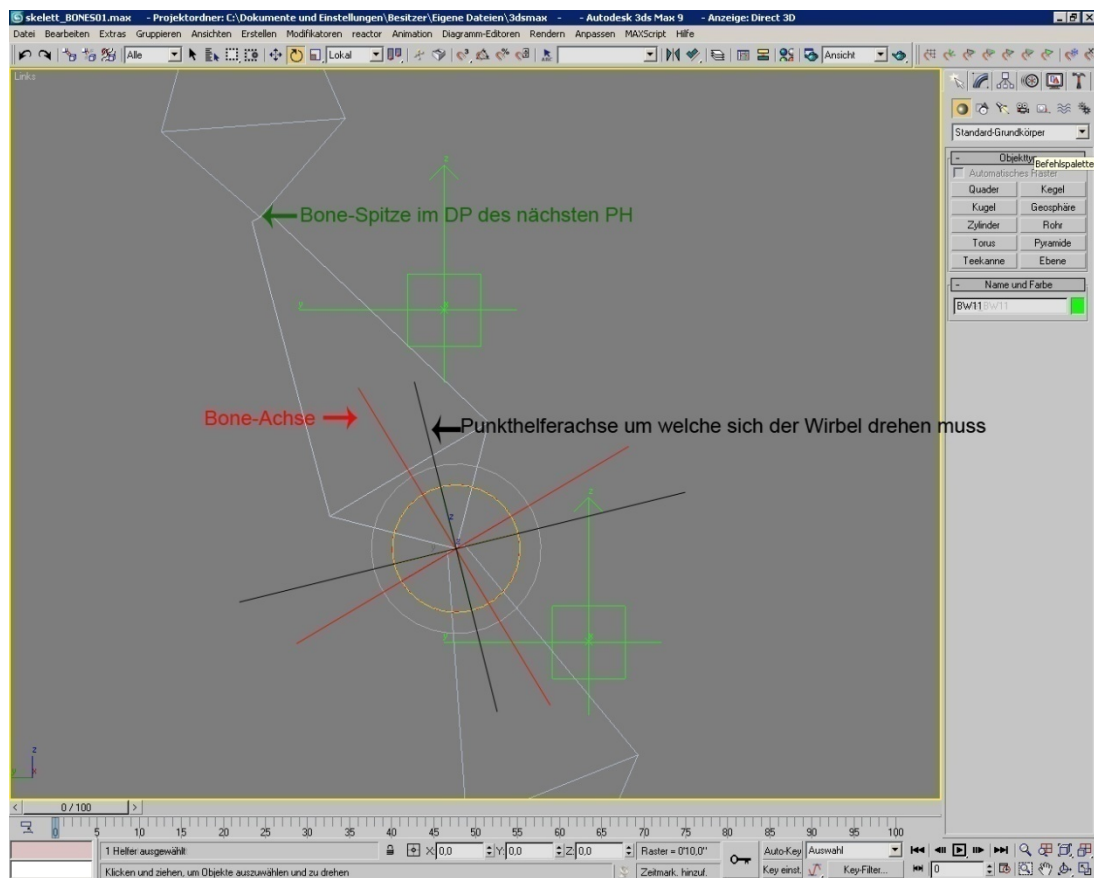


Abbildung 21: Ausrichtungsproblem der Bones

Aufgrund dieser falschen Ausrichtung konnte die anatomiekonforme Bewegung der Wirbelknochen nicht ermöglicht werden. Deshalb wurde nach einer anderen Lösung gesucht. Diese war die Einführung von „Zwischenbones“. In jedem Punkthelfer wurde also ein Bone implementiert und dessen Ausrichtung synchronisiert. Als nächstes wurde über die „Bone-Tool-Palette“ eine Verbindung zwischen die einzelnen Bones erstellt. Abbildung 6.5 zeigt diese Vorgehensweise. Da jeder Bone ein bewegliches Glied einer kinematischen Kette ist, würden sich alle Bones und somit auch die Zwischenbones bewegen lassen. Die Wirbelsäule hätte also doppelt soviel Gelenke wie beabsichtigt. Um dies zu verhindern wurde die Bewegung aller Zwischenbones komplett gesperrt. Das Ergebnis ist eine Wirbelsäulenstruktur, dessen Gelenkzahl und Ausrichtung den realen Verhältnissen entspricht. An dieser Stelle wurde jedoch ein weiteres Problem sichtbar. In einer kinematischen Bone-Kette in Autodesk® 3ds Max 9® richtet sich Berechnung der Eulerwinkel immer nach dem übergeordneten Objekt. Entscheidend ist hier die eingestellte Reihenfolge der Berechnung der Ach-

sen. Die Achse, die zu erst berechnet wird, besitzt die geringste Fehlerquote. Bei der letzten Achse, gleicht sich dann die Bewegung immer mehr den Achsen des übergeordneten Objekts an. In der bereits erstellten Hierarchie sind diese maßgeblichen übergeordneten Objekte immer die Zwischenbones, welche logischerweise eine andere Ausrichtung aufweisen. Also musste eine Lösung gefunden werden, diese Abweichung auszugleichen, damit die Wirbel-Glieder exakt auf den Objekteigenen Achsen rotiert werden können. Infolge dessen wurden Dummys erstellt. Für jede Verbindung zwischen Zwischenbone und Bewegungsbone wurde ein extra Dummy erstellt. In der Hierarchie wurde dieser dazwischen eingegliedert und über die Bone-Hilfsmittel-Palette als Bone Definiert. Da sich die Dummys exakt im Gelenkpunkt der beiden Bones befinden, war eine Sperrung der Rotationsachsen nicht notwendig. Durch diese unerlässliche Modifikation der Bones-Struktur wurde zwar die Komplexität etwas erhöht, jedoch kann nun eine anatomiekonforme Bewegung der einzelnen Wirbelglieder mit Hilfe der Bone-Kette durchgeführt werden.

Der nächste Schritt war die Einrichtung von Beschränkungen. Sicherlich könnte die Struktur auch ohne Beschränkungen animiert werden. Die Anforderung dieser Arbeit ist jedoch, dass ein Benutzer ohne anatomische Vorkenntnisse das Skelett anatomisch korrekt animieren kann. Aus diesem Grund sind Beschränkungen zwingend notwendig. Die Beschränkung der Zwischenbones erfolgte mit Hilfe des Rotationsscript-Controllers wie bereits in Kapitel 4.2.5 beschrieben. Die Einschränkung der Bewegungen der einzelnen Wirbel-Bones wurde über den Float-Limit-Controller realisiert. Auf Basis der ermittelten Werte aus Kapitel 3.2.4 wurden so für jede einzelne Wirbel-Bone-Achse die Rotationswinkel eingeschränkt. Zum Teil mussten die Werte etwas variiert und angepasst werden, da sich die Untersuchungen aus Kapitel 3 auf normierte Mittelwerte beziehen, welche stark den individuellen Eigenschaften eines menschlichen Körpers unterliegen. So wurden einige Rotationswinkel geringgradig modifiziert, um eine saubere Animation frei von Durchdringungen der Geometrien zu gewährleisten.

Als nächster Schritt wurde geprüft inwiefern IK-Ketten implementiert werden müssen bzw. können. Wie bereits erläutert basiert die inverse Kinematik auf komplexen Berechnungen. Je mehr Bones vorhanden sind, desto komplexer die Berechnung, desto größer ist die Fehleranfälligkeit. Da die Wirbelsäulenstruktur sehr komplex geworden ist, wurde entschieden hier keine IK-Kette einzurichten. Die Bewegung der Wirbelsäule wurde auf drei

einzelne Steuerhelfer verteilt, die die Bone-Kette mit direkter Kinematik bewegen sollen. Je einer für die Halswirbelsäule, die Brustwirbelsäule und die Lendenwirbelsäule.

Um die Rotationsachsen der einzelnen Wirbel-Bones mit den Steuerhelfern zu verknüpfen wurde die Parametervernetzung verwendet. Alle beschränkten Achsen der Wirbel-Bones wurden 1:1 mit den entsprechenden Achsen der Helfer verknüpft. Damit die Helfer nicht versehentlich in ihrer Position verändert werden können, wurden die Translations-Achsen mit Hilfe eines Positions-Script-Controllers gesperrt. Zum Schluss wurde eine verlaufsunabhängige IK-Kette vom Unterkiefer zum Schädel erstellt. Da die Struktur zwischen Schädel und Kiefer aus nur drei Bones besteht, kann die Fehlerquote der IK vernachlässigt werden. Das IK-Ziel wurde an eine Helfer-Geometrie gebunden, der wiederum an den Ausgleichsdummy des Schädels geheftet wurde. Dadurch konnte erreicht werden, dass bei allen Bewegungen der Wirbelsäule der Kiefer geschlossen bleibt und nur durch die Bewegung der Kiefer-Steuerung bewegt werden kann.

5.4.2 Der Brustkorb

Die Steuerstruktur des Brustkorbes wurde grundsätzlich in gleicher Art und Weise erstellt wie bei der Wirbelsäule. Da die Rippen-Bones dem jeweiligen Wirbel-Bone der BWS untergeordnet werden müssen (vgl. Kapitel 3.2.4) wurden wieder Ausgleichsdummys erstellt, die an derselben Position stehen wie die Punkthelfer der einzelnen Rippen. Die Dummys wurden direkt an den jeweiligen Wirbel-Bone gelinkt und als Bone definiert. Der eigentliche Rippen-Bone wurde in seiner Ausrichtung dem ermittelten Punkthelfer angepasst. Um diese Bones optisch besser erkennbar zu machen, wurde eine Bone-Kette erstellt, die grob dem Aufbau der Rippe entspricht. Nach dem Beschränken der Rotationen gemäß den ermittelten Vorgaben aus Kapitel 3 wurden über diese Bone-Ketten für jede einzelne Rippe eine verlaufsunabhängige IK gelegt. In den IK-Einstellungen wurden dann die Bones, die nicht beweglich sein sollten (da sie nur einen optischen Nutzen haben) gesperrt. Alle IK-Ziele wurden schließlich an den Bone gelinkt, welchem das Brustbein untergeordnet ist. Durch einfache Translation dieses Brustbein-Bones kann nun das Heben und Senken des kompletten Brustkorbes anatomiekonform durchgeführt werden. Die Translationen dieses Bones wurden ebenfalls eingeschränkt um im Rahmen der natürlichen Bewegungsverhältnisse zu bleiben.

Da der Autor aus ästhetischen Gründen das Entfernen der Knorpelanteile im Brustkorb ausschloss, musste eine Lösung für deren Einbindung gefunden werden. Für diesen Fall wurde keine direkte Modifikation an der Steuerstruktur vorgenommen, sondern eine Methode des Skinings verwendet. Um die Komplexität der Bone-Struktur nicht weiter zu erhöhen, wurde diese Modifikation direkt an der Geometrie des Zygote-Skeletts durchgeführt. Dafür mussten die Knorpel in einzelne Objekte aufgeteilt werden. Das Grundprinzip dieser Modifikation besteht darin, das untere Ende des Knorpels an die entsprechende Rippe und das obere Ende an das Brustbein zu binden. Die Vorgehensweise war dabei immer die gleiche. Zu erst wurde der Modifikator „Poly Auswahl“ hinzugefügt. In dessen Scheitelpunktebene konnte dann das obere Ende mit einer weichen Auswahl selektiert werden. Anschließend musste der Modifikator „Verknüpfte x- Form“ hinzugefügt und für diesen als Ziel das Brustbein definiert werden. Um die Selektion der Scheitelpunkte nach dem Verknüpfen mit dem Brustbein aufzuheben wurde ein weiteres Mal „Poly Auswahl“ hinzugefügt. Um schließlich das untere Ende an die jeweilige Rippe zu binden erfolgte lediglich eine hierarchische Unterordnung des Knorpels unter das entsprechende geometrische Objekt.

5.4.3 Die Schulter

Die Schulter umfasst neben dem Schulterblatt auch die Funktionen des Schlüsselbeines, das mit einem Ende an das Brustbein gebunden ist. Für das Schlüsselbein wurde die Bone-Struktur in gleicher Weise wie für die Rippen erstellt. Somit existieren ein beweglicher Bone im ermittelten Drehpunkt am Brustbein und zwei unbewegliche Bones zur optischen Verdeutlichung. Über diese Kette wurde eine verlaufsunabhängige IK eingerichtet, dessen Ziel an einen Steuerungshelfer des Oberarms gelinkt wurde. Am anderen Ende der Schlüsselbein-Struktur wurde eine Beschränkung der Rotationsachsen gemäß den ermittelten Werten aus Kapitel 4 eingerichtet und eine hierarchische Unterordnung unter den Brustbein-Bone vorgenommen. In Kapitel 3.2.4 wurden die möglichen Bewegungen des Schulterblattes ermittelt. Daraus folgte eine Festlegung von 3 unterschiedlichen Drehpunkten mit jeweils unterschiedlichen Rotationsachsen und Freiheitsgraden. Die grundlegende Vorgehensweise bei der Erstellung der Bone-Struktur blieb auch in diesem Fall gleich, das bedeutet es wurden ebenfalls Ausgleichsdummys geschaffen um die Rotation der Bones um die „richtigen“ Achsen zu gewährleisten. Für jeden der drei Punkthelfer wurde eine separate Bone-Kette erstellt, sowie die Rotationsachsen gesperrt, bzw. gemäß ihrer Freiheitsgrade

eingeschränkt. Um eine Bewegung des Schulterblattes um alle drei Drehpunkte zu ermöglichen, wurden die einzelnen Ketten untereinander hierarchisch verknüpft. Der oberste Bone dieser Hierarchie wurde (über den Ausgleichsdummy) an den naheliegenden Wirbel-Bone gebunden. Damit alle Bewegungen über einen Helfer gesteuert werden können, wurden zwei verlaufsunabhängige IK-Ketten eingefügt. Einmal für die Bewegung des Heben und Senkens und einmal für das Heranziehen und Wegschieben der Schulter. Die IK-Ziele wurden einem Steuerungshelfer untergeordnet. Für die Außenrotation musste eine andere Lösung gefunden werden, da diese Bewegung nur als Mischbewegung mit den beiden anderen auftritt. Diese Mischung konnte nicht sinnvoll über eine IK gelöst werden. Deshalb wurde dem Steuerungshelfer ein Attributenbehälter hinzugefügt. In diesem wurde ein neuer Parameter erstellt mit folgenden Eigenschaften:

- UI-Typ: Spinner
- Wertebereich: 0,0 – 70,0 (Ausmaß der Außenrotation)
- Name: Außenrotation
- Ausrichtung: rechts
- Größe: 100

Dieser Parameter wurde über die Parametervernetzung 1:1 mit der entsprechenden Rotation um die lokale y- Achse verbunden. Durch diese Methode kann nun der Steuerungshelfer im Raum bewegt werden und die Schulter folgt gemäß den anatomischen Vorgaben. Zusätzlich kann über den erstellten Parameter-Spinner die Außenrotation manuell hinzu gemischt werden.

5.4.4 Der Arm

Das Rigging des Armes gliedert sich in 2 Teile. Zum einen die Erstellung der Struktur des Unterarmes zusammen mit dem Handgelenk, zum anderen die Einrichtung der Hand- und Fingersteuerung. Der erste Schritt bestand darin ein Bone-Gerüst mit Ausgleichsdummys zu erstellen. Dabei wurden Zwischenbones eingefügt, um die beweglichen Teile zu verbinden. Der Ausgleichsdummy des Oberarms wurde mit dem des Schlüsselbeines verbunden und unterliegt damit hierarchisch dem Steuerungs-Helfer der gesamten Schulter. Dadurch ist bei Bewegung der Schulter auch eine Mitführung des Armes gewährleistet. Eine besondere Herausforderung stellte die Rotation des Handgelenks dar, da hier eine Verdrehung von Elle und Speiche hervorgerufen wird. Diese Verdrehung findet um einen Rotationspunkt statt, der im Mittelpunkt der Handwurzel liegt. Da im Nachhinein eine verlaufsunabhängige IK von der Handwurzel zum Oberarm eingerichtet werden soll, musste hier eine Lösung gefunden werden, die diese IK nicht beeinflusst. Dazu wurden zuerst zwei IK-Ketten jeweils für Elle und Speiche erstellt. Danach wurde ein Kreis mit seinem Pivot genau an der Stelle positioniert, welche mit dem Drehpunkt der Verdrehung identisch ist. Der Durchmesser des Kreises entsprach dem Abstand der zwei IK-Ziele. Diese wurden direkt an den Kreis gelinkt. Durch Rotation des Kreises konnte die Verdrehung durchgeführt werden. Jedoch musste der Kreis noch an den Unterarm gebunden werden, damit er bei Bewegung des Armes mitgeführt wird. Als Link-Ziel wurde dafür der Ausgleichsdummy der Elle verwendet, da dieser kein Bestandteil der Ellen-IK und auch kein direkter Bestandteil der gesamten Arm-IK ist. Damit die Arm-IK, die sich von Handgelenk zum Oberarm erstreckt, diese Konstruktion nicht beeinflusst, wurden Dummys an den 3 Gelenken erstellt (Oberarm, Ellenbogen, Handgelenk). Diese wurden als Bones definiert und den jeweiligen Ausgleichsdummys übergeordnet. Die Arm-IK wurde dann nur über diese 3 Dummys erstellt. Am Handgelenk musste nun wieder ein Steuerhelfer eingerichtet werden. diesem wurde zu erst das IK-Ziel der Arm-IK untergeordnet, sodass der gesamte Arm mit diesem Helfer bewegbar ist. Damit über diese Steuergeometrie auch die Verdrehung des Unterarms durchgeführt werden kann, wurde der Kreis mit einer „Ausrichten-Beschränkung“ daran gebunden. Um den gesamten Arm in seiner Bewegung besser steuern zu können wurde der Arm-IK-Kette noch ein Objekt als IK-Ketten-Drehpunkt hinzugefügt. Dieser ist ebenfalls ein Steuerhelfer, der auf Höhe des Ellenbogens positioniert wurde.

Danach folgte das Rigging der Hand mit Fingern. Für die Erstellung des Bone-Gerüst wurde wieder die Methode mit Ausgleichsdummys und Zwischenbones verwendet. Da das Handgelenk neben der Verdrehung mit dem Unterarm noch zwei weitere Bewegungsmöglichkeiten mit unterschiedlichen Drehpunkten besitzt, wurden dafür zwei verschieden bewegliche Bones erstellt. Diese konnten, anders als beim Schulterblatt, in einer Kette implementiert werden. Diese Bewegungsarten wurden als Parameter-Spinner in einem Attributenbehälter des Unterarm-Steuerhelfers eingefügt.

Für jeden einzelnen Finger musste eine separate Bone-Kette eingerichtet werden, die jeweils über den Ausgleichsdummy an den Handwurzel-Bone der Seitenrotation gelinkt wurde. Die beweglichen Bones wurden wie üblich gemäß den ermittelten Vorgaben aus Kapitel 3.2.4 in ihren Rotationen beschränkt, bzw. gesperrt. Der Anspruch an die Bewegungsmöglichkeiten der Finger war zum einen, dass alle Fingerglieder gleichzeitig bewegt werden können und zum anderen auch einzeln und unabhängig voneinander. Daher wurde auf eine IK verzichtet und sämtliche Fingerfunktionen als Parameter-Spinner in einem Attributenbehälter in der Handgelenksteuerung untergebracht. Zusätzlich bietet sich hier die Verwendung des Parameter-Kollektors an. In diesem wurde für jeweils für die rechte und linke Hand eine Sammlung angelegt, in die alle Bewegungsparameter der Finger eingefügt wurden. Somit können die Finger einzeln, aber auch auf sehr effiziente Weise gleichzeitig bewegt werden.

Das Daumen-Sattelgelenk kann ebenfalls um zwei verschiedene Drehpunkte bewegt werden, deshalb wurden hier wie bei der Handwurzel zwei Bones innerhalb einer Kette für ein Gelenk verwendet. Die Bewegungsfunktionen der einzelnen Daumenglieder wurden wie bei den Fingern wieder im Steuerhelfer des Handgelenks implementiert. Das Ergebnis dieses komplexen Riggings des Armes, waren drei Steuerhelfer mit denen Schulter, Arm, Ellenbogen, Handgelenk und alle Finger anatomiekonform bewegt werden können.

5.4.5 Das Kniegelenk

Aufgrund der Komplexität der Bewegung des menschlichen Knies stellte dieses Rigging eine besondere Herausforderung dar. Wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben folgt die Kniescheibe bei Bewegung des Unterschenkels einer Gleitbewegung. Auch die Bewegung des Unterschenkels ist keine reine Rotation, sondern eine Mischung aus Gleitbewegung und Rollen. Für diese Bewegungsabläufe musste eine spezielle Lösung gefunden werden.

Zu erst wurde eine Bone-Kette eingerichtet, welche sich vom Oberschenkelgelenk zur Kniescheibe erstreckt. Dadurch ist der Bone der Kniescheibe direktes Unterglied des Oberschenkels. Die Gelenkpunkte der Bones befinden sich wie üblich an den ermittelten Positionen der Punkthelfer, ebenso wurden wieder Ausgleichsdummys verwendet. Der Ausgleichsdummy des Oberschenkels wurde an den Wurzel-Bone der Wirbelsäule gelinkt um eine Verbindung der Beine zum Rest des Körpers zu schaffen. Die Beschränkungen wurden wie üblich durch Controller eingerichtet, außer für den Kniescheiben-Bone. Dessen Beschränkung mit der Einrichtung des Unterschenkel-Riggings zusammen hängt. Für den Unterschenkel wurde eine vorerst separate Bone-Kette erstellt und mittels Controller in seiner Bewegungsfreiheit gemäß den anatomischen Vorgaben beschränkt. Dabei bezog sich die Beschränkung ausschließlich auf die möglichen Rotationen des Kniegelenks. Diese sind die Rotation um die Längsachse des Unterschenkels, sowie die Rotation der Rollgleitbewegung des Kniegelenks. Für die Gleitbewegung wurde ein Pfad erstellt, der den Untersuchungen aus Kapitel 3.2.4 entspricht. Dieser Pfad wurde direkt an den Oberschenkel-Bone gelinkt. Über eine Pfad-Beschränkung konnte nun der Unterschenkel-Bone an die Kontur gebunden werden. Da bei der Bewegung des Knies ausschließlich eine Mischbewegung stattfindet, musste eine Methode gefunden werden diese Roll-Gleitbewegung zu automatisieren. Dafür kam der Reaktionsmanager zum Einsatz. Es wurde die lokale x- Rotation des Unterschenkel-Bone-Ausgleichsdummy als Master definiert. Als Slave-Parameter wurde zum einen der Prozentwert der Pfadbeschränkung eingerichtet, zum anderen die Rotation des Kniescheiben-Bones. Die Verschiedenen definierten Zustände entsprechen den ermittelten Vorgaben aus Kapitel 3.2.4. Zum Schluss wurde wieder ein Steuerhelfer eingerichtet. Diesem wurde die Unterschenkel-Rotation mit ihren verschiedenen Zuständen untergeordnet. Durch Drehung dieses Helfers konnte als eine anatomiekonforme Bewegung des Kniegelenks, samt Gleitbewegung der Kniescheibe durchgeführt werden. Die Längsrotation von Ober- und Unterschenkel wurden wieder als Parameter-Spinner im Steuerhelfer platziert. Über diesen

Helfer musste jedoch auch die Bewegung des Oberschenkels, d.h. auch des gesamten Beines durchführbar sein. Aufgrund der Pfadbeschränkung und der Master-Slave-Beziehungen des Reaktions-Managers konnte keine IK vom Knöchel zum Oberschenkel implementiert werden. Deshalb wurde eine IK vom starren Zwischenbone des Oberschenkels zum Hüftgelenk erstellt, der nur das Hüftgelenk bewegt. Das Ziel wurde direkt an den Steuerhelfer des Kniegelenks gelinkt.

5.4.6 Das Fußgelenk

Die Konstruktion der Steuerung für den Fuß ähnelte teilweise dem Rigging der Hand, jedoch nur bezogen auf die Zehen. Nach der Einrichtung der Bone-Kette mit Zwischenbones und Ausgleichsdummys, wurden die Achsen gemäß den Vorgaben aus Kapitel 3.2.4 beschränkt bzw. gesperrt. Auch hier wurden die Bewegungen der Zehen als Parameter-Spinner eingerichtet. Diese wurden dem Steuerhelfer des Fußgelenks in einem Attributenbehälter hinzugefügt. Um die Zehen effizient bewegen zu können, wurde mit Hilfe des Parameter-Kollektors für jeden Fuß eine Sammlung angelegt, welche die Parameter der einzelnen Zehenglieder beinhalten. Da die Bewegung des Fußes keinen Einfluss auf den Unterschenkel mit dem Wadenbein hat, wurde die Bone-Kette des Unterschenkels zum Fersenbein hin weitergeführt und beinhaltet jeweils einen beweglichen Bone für das obere und untere Sprunggelenk. Für die Tarsalgelenke, die als eine Einheit definiert wurden, wurde eine separate Bone-Kette eingerichtet werden, die sich in den Zehen aufspaltet. Hierarchisch wurde dieser Strang dem unteren Sprunggelenk untergeordnet. Somit ist eine Bewegung um alle drei Gelenke möglich. Da hier nicht unbedingt Mischbewegungen stattfinden, wurde die Rotation im oberen Sprunggelenk an die lokale x- Achse und die Rotation im unteren Sprunggelenk an die lokale z- Achse des Steuerhelfers gebunden. Diese Verbindung erfolgte über die Parameternetzung. Da auch die Vorderfußrotation keine Mischbewegung ist, sich jedoch nicht sinnvoll an die Achsen des Steuerdummy binden ließ, wurde sie als Parameter-Spinner in einem Attributenbehälter implementiert.

Laut den Untersuchungen aus Kapitel 3 existiert innerhalb der Tarsalgelenke noch eine weitere leichte Bewegung. Diese tritt beim Heben und Senken des Fußes, also in Verbindung mit dem oberen Sprunggelenk auf, und besitzt einen Gesamtumfang von 20 Grad. Deshalb konnte sie im Hinblick auf die Anatomiekonformität nicht außer Acht gelassen

werden. Sie tritt jedoch nur als Mischbewegung auf und wurde deshalb mit Hilfe des Reaktionsmanager an die Rotation des oberen Sprunggelenks gekoppelt. Über den Steuerhelfer können nun alle Rotationen des Fußgelenks, sowie alle Bewegungen der Zehen gesteuert werden.

5.4.7 Verlinkung der Steuerhelfer

Nach der Einrichtung aller Bone-Ketten, IK-Ketten, Beschränkungen und Parametern entstand als „Oberste Steuerung“ des Skeletts eine Sammlung aus 16 Steuerhelfern, deren Eigenschaften und Bewegungsmöglichkeiten in den Tabellen 4 und 5 dargestellt sind.

Als letzter Schritt mussten diese Helfer noch untereinander verlinkt werden, damit sie bei Bewegung andere Helfer mitgeführt werden. Ebenso musste ein zentraler Helfer erstellt werden, mit dem das gesamte Skelett im Raum positioniert werden konnte. Aufgrund der komplexen Steuerstruktur und den komplexen Bewegungen war eine direkte Verlinkung untereinander teilweise nicht möglich. Deshalb mussten einige Steuerhelfer den Ausgleichsdummys untergeordnet werden. Dies traf beispielsweise in der Wirbelsäule zu. Damit die Helfer für HWS und BWS bei Rotation der LWS an Ort und Stelle bleiben, wurden sie an einen Ausgleichsdummy gemäß ihrer Position gebunden.







Name	Abbildung	direkte Steuerung	indirekte Steuerung
Anfasser_Körper		gesamtes Skelettmodell	keine
Anfasser_LWS		Lendenwirbelsäule	keine
Anfasser_BWS		Brustwirbelsäule	keine
Anfasser_HWS		Halswirbelsäule	keine
Anfasser_Unterkiefer		Unterkiefer	keine
Anfasser_Brustbein		Brustbein Rippen r/l Schlüsselbein r/l	keine

Tabelle 4: Steuerhelfer und ihre Eigenschaften Teil 1






Name	Abbildung	direkte Steuerung	indirekte Steuerung
Anfasser_r/l_Schulter		Schulter r/l: Weg/Heranziehen, Seitenrotation	Schulter r/l: Außenrotation
Anfasser_r/l_Ellenbogen		Ellenbogen r/l	keine
Anfasser_r/l_Arm		Arm r/l: Bew. Oberarm, Bew. Unterarm, Verdrehung Handgelenk mit Unterarm	Hand r/l: Beugen Handgelenk, Seitenrotation Handgel., alle Bewegungen der Finger und Daumen
Anfasser_r/l_Bein		Bein r/l: Bew. Oberschenkel, Roll-Gleiten Kniegelenk mit Bew. Kniescheibe	Bein r/l: Rot. Oberschenkel, Rot. Unterschenkel
Anfasser_r/l_Fuß		Fuß r/l: Rot. OSG, Rot. USG	Fuß r/l: Rot. Vorderfuß, alle Bewegungen der Zehen

Tabelle 5: Steuerhelfer und ihre Eigenschaften Teil 2

6 Zusammenfassung

6.1 Gegenüberstellung von Zielsetzung und Ergebnis

Das Ziel dieser Arbeit war ein anatomiekonformes Rigging des menschlichen Skeletts. Dabei musste eine Lösung gefunden werden die funktionelle Anatomie eines Menschen in die 3D- Software Autodesk® 3ds Max® zu übertragen. Das Ergebnis ist eine komplexe Steuerstruktur bestehend aus 383 Bones, 40 IK-Ketten, 357 Helfern, 4 Konturen und 16 Steuerobjekten. Mit dieser Struktur ist eine anatomiekonforme Bewegung des Skelettmodells detailgetreu durchführbar.

6.2 Zusammenfassung und Bewertung

6.2.1 Durchführung des Riggings

Um dieses Rigging durchzuführen, mussten im Vorfeld mehrere Untersuchungen stattfinden. Zu erst wurden die Grundlagen der Computeranimation und des Charakter-Riggings erörtert. Dabei wurde gezeigt, dass Steuerstrukturen im Allgemeinen die komplexen Bewegungen des Menschen nicht nachahmen müssen. Grund dafür ist, dass in den meisten Fällen die Steuerstruktur mit Hilfe eines Skinings an einen Netzkörper gebunden wird. Dadurch ist die anatomisch korrekte Bewegung von Gelenken nicht notwendig. Eine der wichtigsten Untersuchungen dieser Arbeit war die Analyse der funktionellen Anatomie des menschlichen Skeletts. Die dafür zur Verfügung stehende Literatur aus dem Bereich der Medizin und Physiotherapie, sowie die Konsultationen von Fachkundigen, brachten genügend Informationen über die Funktionalität der Gelenke. Die wichtigsten, welche für diese Diplomarbeit essentiell waren, sind:

- Art des Gelenks
- Position und Ausrichtung des gelenkeigenen Drehpunktes
- Freiheitsgrade des Gelenks in den einzelnen Drehachsen

Der nächste Schritt war eine Analyse, mit welchen Hilfsmitteln die gesammelten Informationen in der 3D- Software Autodesk® 3ds Max® umgesetzt werden können. Die Unter-

suchung der Implementierungsmöglichkeiten bezieht sich ausschließlich auf den Standardumfang dieser Software. Diese Analyse gliederte sich in zwei Teile.:

- die Untersuchung einer vorgefertigten Steuerstruktur (Biped)
- die manuellen Erstellung einer Struktur

Dabei wurde auf die wichtigsten und in der Praxis am häufigsten verwendeten nützlichsten Methoden eingegangen. Am Ende der Analyse wurde vom Autor die Entscheidung getroffen, dass die manuelle Konstruktion einer Steuerstruktur für diesen speziellen Fall am sinnvollsten ist. Darauf folgte eine Erläuterung wie bei der Konstruktion dieser Steuerstruktur vorgegangen wurden. Es wurde erörtert, wo spezielle Lösungen gefunden werden mussten, um der Forderung einer anatomiekonformen Bewegung nachzukommen. Das geschah immer im Hinblick auf die Grundlagen und Grundsätze des Charakter Riggings. Jedoch mussten dabei einige Abstriche gemacht werden, da die Anatomiekonformität im Vordergrund stand.

6.2.2 Bewertung der Anatomiekonformität

Das Resultat ist eine komplette, funktionierende Steuerstruktur für das gesamte Skelettmodell der Firma Zygote. Über die Steuerhelfer sind alle Bewegungen in vollem Umfang und mit der höchstmöglichen Detailtreue anatomisch korrekt durchführbar. Die Drehpunkte der einzelnen Gelenke sowie die Freiheitsgrade der Bewegungsachsen entsprechen exakt den anatomischen Vorgaben. Wie in Kapitel 4 gezeigt wurde, ist ein komplexes Rigging in diesem Ausmaß mit einem vorgefertigten Biped nicht möglich. Somit kann geschlussfolgert werden, dass die Entscheidung eine eigene Steuerstruktur zu entwickeln richtig war. Nur dadurch konnten die funktionellen Eigenschaften des menschlichen Skeletts auf das 3D-Modell übertragen werden. Dabei entsprechen die Bewegungsmöglichkeiten durch das Rigging detailliert den Untersuchungen aus Kapitel 3. Im Hinblick auf die Anatomiekonformität wurde dieser Versuch von Physiotherapeuten als positiv beurteilt.

6.2.3 Praktische Bewertung des Riggings

Ein weiterer Punkt der Bewertung ist die Handhabung der Steuerung. Eine Steuerstruktur sollte demnach folgende Anforderungen zu erfüllen:

- einfache Handhabung bei gleichzeitiger maximaler realitätsnähe
- einfache und effiziente Animierbarkeit
- hoher Umfang an Bewegungsmöglichkeiten

Alle Punkte werden vom Rigging des Skelettmodells erfüllt, da alle Bewegungen des menschlichen Skeletts mit nur 17 Steuerhelfern durchgeführt werden könne. Zudem Lassen sich viele Bewegungen durch die Vorteile des Parameter-Kollektors effizient gleichzeitig steuern. Somit ist auch eine praktische Verwendung der Steuerstruktur gewährleistet. Deshalb ist der Versuch des anatomiekonformen Riggings auch in diesem Punkt als positiv zu bewerten.

6.2.4 Allgemeine Bewertung dieses Versuchs

Als letzter Punkt ist die allgemeine Durchführung eines solchen Riggings zu bewerten. Die Konstruktion einer anatomiekonformen Steuerstruktur erforderte im Vorfeld einen hohen Rechercheaufwand. Neben den Softwareabhängigen Methoden und Mitteln des Riggings musste eine detaillierte Analyse der anatomischen Voraussetzungen erfolgen. Die Umsetzung dieser Erkenntnisse erforderte einen hohen zeitlichen Aufwand, da die Erstellung von Bone-Ketten, IK-Ketten, Helfern, Beschränkungen etc. gut durchdacht werden musste. Die Implementierung der Steuerstruktur nahm ebenfalls viel Zeit in Anspruch. Trotzdem wird der Versuch vom Autor als positiv bewertet, da eine funktionierende Steuerstruktur entwickelt wurde die der Zielstellung dieser Arbeit entspricht. Auch der Erfahrungswert aus dieser Arbeit kann als hoch eingeschätzt werden, da die anatomischen Kenntnisse sowie die theoretischen und praktischen Erfahrungen sich zukünftig auf jedes beliebige Skelettmodell bzw. Rigging übertragen lassen.

7 Ausblick zur Weiterentwicklung

In der Einleitung dieser Arbeit wurde erwähnt, dass das anatomiekonforme Rigging des Zygote-Skelettmodells nur der erste Schritt eines komplexen Projektes ist. Das Ziel dieses Projektes ist es die Zygote- Modelle von Mann und Frau so zu verändern, dass sie mit wenigen Parametern an projektspezifische Vorgaben bzw. an individuelle Kundenwünsche angepasst werden können. Dazu kann jeweils für Mann und Frau in folgende Phasen unterteilt werden:

- Phase 1: Variation und Animation der Körperhaltung
- Phase 2: Variation der Körperproportionen
- Phase 3: Variation der Kopfformen, Frisuren und Gesichtszüge

Diese einzelnen Phasen werden in verschiedene Schritte gegliedert. Diese Diplomarbeit wurde bereits als erster Schritt der Phase 1 eingeordnet und erfolgreich durchgeführt. Alle folgenden Maßnahmen dieses Projekts könnten in Zukunft Themen für weitere Diplomarbeiten sein. So ist beispielsweise der nächste Schritt in Phase 1 das Skinning aller Elemente des menschlichen Körpers. Das bedeutet, dass Nerven, Organe, Adern, Sehnen, Muskeln etc. an die Teile des Skelettsystems gebunden werden, so dass sie sich anatomiekonform zusammen mit dem Skelett bewegen lassen. Das setzt eine detaillierte Analyse der gesamten menschlichen Anatomie voraus. Besonders das Verhalten von Muskeln, Organen etc. bei Bewegungen ist dabei zu untersuchen.

Ein nächster Schritt ist die Erzeugung von typischen Bewegungszyklen. Die Diplomarbeit gibt zunächst nur die Möglichkeit das Skelett über ein Benutzerinterface anatomiekonform zu bewegen. Eine Abfolge spezieller Bewegungen wie beispielsweise des Laufens wird nicht beachtet. Deshalb sollte eine Studie durchgeführt werden wie spezielle Bewegungszyklen funktionieren. Das können verschiedene Laufzyklen wie Rennen, Gehen, Springen etc. sein oder Armbewegungen. Des Weiteren müsste untersucht werden, wie sich diese Zyklen mit dem Rigging vereinbaren lassen. Zusätzlich könnten typische Einzelposen definiert werden. Das sind zum Beispiel Liegeposen auf einem Operationstisch. Hier müsste untersucht werden, wie sich Gelenke, Muskeln etc. bei bestimmten Posen verhalten.

Auch Phase 2 und 3 könnten Themen für weitere Diplomarbeiten sein. In Phase 2 muss in einer Studie erörtert werden, welche typischen Körperformen existieren. Dabei sollten die verschiedenen Körpertypen oder altersabhängige Körperformen untersucht werden. Für die Umsetzung können Morphziele definiert werden, mit denen das Ausgangsmodell schnell in ein ästhetisches Modell mit anderen Proportionen verändert werden kann. Des Weiteren schließt sich hier Phase 3 an. Da ähnliche Studien und Untersuchungen für die verschiedenen Kopfformen durchzuführen sind. Für die Veränderung bzw. der Animation der Gesichtszüge ist wieder eine anatomische Analyse notwendig, da auch das Verhalten der Gesichtsmuskulatur berücksichtigt werden muss.

Innerhalb dieser Entwicklungspipeline wird es wahrscheinlich noch weitere Phasen geben, um die Modelle anzupassen und zu verfeinern. Deshalb besitzt dieses Projekt der Firma CAST ein enormes Potential für weitere wissenschaftliche Arbeiten. Dabei zählt immer der Gedanke für jeden medizinischen Computeranimationsfilm ein individuelles Modell schnell und effizient zur Verfügung zu haben.

Literaturverzeichnis

- Autodesk.** *Autodesk 3ds Max 9 Benutzerreferenz.*
- . **2009.** *Produktbroschüre Autodesk 3ds Max.* 2009.
- Brüderlin, Beate und Meier, Andreas.** **2001.** *Computergrafik und geometrisches modellieren.* s.l. : Vieweg+Teubner, 2001.
- Brugger, Ralf.** **1994.** *3D- Computergrafik und –animation - Mit einer Beschreibung von Autodesk 3D Studio.* Bonn, Paris : Verlag Addison- Wesley, 1994.
- Bruns, Kai und Ackermann, Ralf.** **2005.** *Taschenbuch der Medieninformatik.* s.l. : Hanser Verlag, 2005.
- Deutsche Enzyklopädie, Deutsche Enzyklopädie.** **2008.** *Deutsche Enzyklopädie.* www.lexikon.calsky.com. [Online] 2008. www.lexikon.calsky.com.
- Dobrinski, Paul, Krakau, Gunter und Vogel, Anselm.** **2007.** *Physik für Ingenieure.* s.l. : Vieweg+Teubner, 2007.
- Eckstein, Peter P.** **2006.** *Repetitorium Statistik, Deskriptive Statistik, Stochastik, Induktive Statistik.* s.l. : Gabler, 2006.
- Haun, Matthias.** **2007.** *Handbuch Robotik: Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter.* s.l. : Springer, 2007.
- Heimann, Bodo, Gerth, Wilfried und Popp, Karl.** **2006.** *Mechatronik: Komponenten- Methoden- Beispielen.* s.l. : Hanser Verlag,, 2006.
- Hering, Ekbert, Steinhart, Heinrich und Bürkle, Heinz-Peter.** **2005.** *Taschenbuch der Mechatronik.* s.l. : Hanser Verlag, 2005.
- Hochschild, Jutta.** **2002.** *Funktionelle Anatomie: Strukturen und Funktionen begreifen; therapierelevante Details.* Stuttgart, New York : Thieme Verlag, 2002. Bde. 1,2.
- Husty, Manfred, et al.** **1997.** *Kinematik und Robotik.* s.l. : Springer, 1997.

- Jackèl, Dietmar, Neunreither, Stephan und Wagner, Friedrich. 2006.** *Methoden der Computeranimation*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006.
- Kemnitz, Arnfried. 2006.** *Mathematik zum Studienbeginn, mathematisch-naturwissenschaftlichen und wirtschaftswissenschaftlichen Studiengänge*. s.l. : Vieweg+Teubner, 2006.
- Kohlmann, Klaus. 2007.** *Der computeranimierte Spielfilm, Forschungen zur Inszenierung und Klassifizierung des 3-D-Computer-Trickfilms*. s.l. : Transcript, 2007.
- Kunst Universität Linz. 2009.** Digital Media for Artists. *Digital Media for Artists*. [Online] 2009. <http://www.dma.ufg.ac.at>.
- Maestri, George. 1996.** *Digital Character Animation*. Indianapolis USA : New Riders Publishing, 1996.
- MediDesign Frank Geisler, MediDesign Frank Geisler.** Anatomie Online. [Online] <http://www.anatomie-online.com/Seiten/anato042.html>.
- Moll, Karl Josef und Moll, Michaela I. 2004.** *Atlas Anatomie*. München,Jena : Verlag Urban& Fischer, 2004.
- Nehmzow, Ulrich. 2002.** *Mobile Robotik: Eine praktische Einführung*. s.l. : Springer, 2002.
- Neutsch, Wolfram. 1995.** *Koordinaten: Theorie und*. Heidelberg; Berlin; Oxford : Spektrum, Akad. Verlag, 1995.
- Nischwitz, Alfred. 2007.** *Computergrafik und Bildverarbeitung*. s.l. : Vieweg+Teubner Verlag, 2007.
- OTC media GmbH, OTC media GmbH. 2009.** G Netz- das Gesundheitsnetzwerk. [Online] 2009. http://www.g-netz.de/Der_Mensch/skelett/index.shtml.
- Parameter Collector: Sammelleidenschaft.* **Breidt, Martin. 2008.** 2008, Digital Production, S. 62-67.
- Parent, Rick. 2002.** *Computer Animation: Algorithms and Techniques*. s.l. : Morgan Kaufmann, 2002.

- Polevoi, Rob. 1999.** *3D Studio Max R3, In Depth*. s.l. : Coriolis Group, 1999.
- R.Nickel, Schummer, A. und Seiferle, E. 1992.** *Lehrbuch der Anatomie der Haustiere*. [Hrsg.] J.Frewein. Berlin;Hamburg : Paul Parey, 1992. Bd. 1 Bewegungsapparat.
- Reaktionsschnell- der Reaction Manager*. **Breidt, Martin. 2008.** 2008, Digital Production, S. 68-74.
- Reuleaux, Franz. 1875.** *Theoretische Kinematik*. Braunschweig : s.n., 1875.
- Scherfgen, David. 2006.** *3D-Spieleprogrammierung mit DirectX 9 und C++*. s.l. : Hanser Verlag, 2006.
- Schmitz, Roland, et al. 2007.** *Kompendium Medieninformatik: Medienpraxis*. s.l. : Springer, 2007.
- Scriptspot. 2009.** Scriptspot. *Scriptspot*. [Online] 2009. <http://www.scriptspot.com/>.
- Steinmetz, Ralf. 2000.** *Multimedia-technologie: Grundlagen, Komponenten und Systeme*. s.l. : Springer, 2000.
- Weber, Wolfgang. 2007.** *Industrieroboter, Methoden der Steuerung und Regelung*. München : Hanser Verlag, 2007.
- Wendt, Volker. 2006.** *discreet 3ds max 8*. Heidelberg : bhv, Redline GmbH, 2006.
- Wolfer, David P.** www.dpwolfer.ch. [Online] www.dpwolfer.ch.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Teile die wörtlich oder sinngemäß einer Veröffentlichung entstammen, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde noch nicht veröffentlicht oder einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, 18. August 2009